

# 卵磷脂与山梨醇酐单硬脂酸酯复合 对菜籽油凝胶凝胶特性的影响

毛筱艺,王丽萍,吴玉柱,刘军,吴迅,牛银红,刘敦华

(宁夏大学食品与葡萄酒学院,银川750000)

**摘要:**为增强卵磷脂在食品领域的适用性,促进菜籽油凝胶的开发,以菜籽油为基料油,添加卵磷脂和山梨醇酐单硬脂酸酯(SMS)制备菜籽油凝胶,探究卵磷脂与SMS质量比(0:10、1:9、2:8、3:7和4:6)对其理化性质、微观结构与氧化稳定性的影响。结果表明:卵磷脂与SMS质量比对菜籽油凝胶硬度和析油率具有显著影响( $p < 0.05$ ),卵磷脂与SMS质量比为2:8时菜籽油凝胶的硬度最高,析油率最低;菜籽油凝胶的弹性模量( $G'$ )均大于黏性模量( $G''$ ),表明全部形成凝胶结构,卵磷脂与SMS质量比为2:8时具有最高的弹性模量和黏性模量;XRD、氧化稳定性、FTIR和DSC分析表明,卵磷脂比例的增加有利于菜籽油凝胶结晶和氧化稳定性的提升,但热力学稳定性降低,菜籽油凝胶网络分子间作用力以氢键为主。综上,卵磷脂与SMS复合作为凝胶剂可有效固化菜籽油成功构建菜籽油凝胶体系,其中卵磷脂与SMS质量比为2:8时形成的菜籽油凝胶的凝胶特性最好。

**关键词:**菜籽油凝胶;卵磷脂;山梨醇酐单硬脂酸酯;凝胶特性

中图分类号:TS225.1;TQ645 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)12-0031-06

## Effect of lecithin and sorbitan monostearate compound on gel properties of canola oil oleogels

MAO Xiaoyi, WANG Liping, WU Yuzhu, LIU Jun,  
WU Xun, NIU Yinhong, LIU Dunhua

(College of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** To enhance the applicability of lecithin in the food field and promote the development of canola oil oleogels, canola oil oleogels were prepared by adding lecithin and sorbitan monostearate (SMS) to canola oil, and the effects of mass ratios of lecithin to SMS (0:10, 1:9, 2:8, 3:7 and 4:6) on their physicochemical properties, microstructure and oxidation stability were investigated. The results showed that the mass ratio of lecithin to SMS had significant effects on the hardness and oil separation rate of canola oil oleogels ( $p < 0.05$ ), and the hardness of canola oil oleogels was the highest and the oil separation rate was the lowest when the mass ratio of lecithin to SMS was 2:8. The elastic modulus ( $G'$ ) of canola oil oleogels was higher than the viscosity modulus ( $G''$ ), indicating that all gel structures were formed, and it has the highest  $G'$  and  $G''$  when the mass ratio of lecithin to SMS was 2:8. XRD, oxidative stability, FTIR and DSC analysis showed that the increase of lecithin promoted the crystallization and oxidative stability of canola oil oleogels, but the thermodynamic stability decreased, and the intermolecular forces of canola oil oleogels network were mainly hydrogen bonding. In conclusion, the

compound of lecithin and SMS as gelling agents can effectively solidify canola oil to successfully build canola oil oleogels system, and canola oil oleogels formed at the mass ratio of lecithin to SMS 2:8 has the best gel properties.

**Key words:** canola oil oleogels; lecithin; sorbitan monostearate; gel property

收稿日期:2021-10-09;修回日期:2022-08-21

基金项目:宁夏回族自治区农业科技自主创新资金(NGSB-2021-6-05)

作者简介:毛筱艺(1998),女,硕士研究生,研究方向为食品营养与安全(E-mail)1242728854@qq.com。

通信作者:刘敦华,博士生导师(E-mail)dunhualiu@126.com。

传统脂肪产品中通常含有较高含量的饱和脂肪酸及反式脂肪酸,是导致肥胖、糖尿病等慢性疾病的主要原因<sup>[1]</sup>。适当降低脂肪食品中的饱和脂肪酸及反式脂肪酸含量,对其营养结构的改善具有重要意义。植物油凝胶是以植物油为连续相,添加低浓度的单组分或多组分凝胶剂分子<sup>[2]</sup>,在冷却阶段,凝胶剂和植物油之间的亲和力降低,导致凝胶剂分子自组装形成三维网络结构,从而使整个体系凝胶化<sup>[3]</sup>。植物油凝胶具有与塑性脂肪相似的理化性质,是可替代传统固态脂肪的健康脂肪。研究开发低饱和脂肪酸和零反式脂肪酸的植物油凝胶,作为传统脂肪的代替品具有重要意义。

凝胶剂作为油凝胶的关键组成部分,在油凝胶制备中至关重要。卵磷脂在食品工业中用作乳化剂和添加剂,且具有抗氧化活性<sup>[4-5]</sup>。山梨醇酐单硬脂酸酯(SMS)是制备油凝胶常用的凝胶剂<sup>[6]</sup>。Pernetti等<sup>[7]</sup>以卵磷脂和山梨醇酐三硬脂酸酯为凝胶剂,与食用油混合制备卵磷脂/山梨醇酐三硬脂酸酯有机油凝胶,由于所得油凝胶的热可逆性和剪切敏感性使其应用更加广泛;Barbosa等<sup>[8]</sup>以SMS和全氢化棕榈油为凝胶剂,以棕榈油和菜籽油为连续相,制备食品级油凝胶,发现添加SMS和全氢化棕榈油的油凝胶可以形成致密的晶体脂肪网络,提高耐热性和稠度,从而获得含有大量不饱和脂肪酸的更健康的结构化脂质材料。

卵磷脂和SMS作为凝胶剂单独使用时成胶能力较弱,为验证二者在联合使用时的凝胶特性并探究成胶机制,增强卵磷脂在食品领域的适用性,促进菜籽油凝胶的开发,本文以卵磷脂和SMS为凝胶剂制备菜籽油凝胶,通过质构、流变学、X射线衍射(XRD)、差示扫描量热(DSC)和傅里叶变换红外光谱(FTIR)等分析,对样品的硬度、析油率、物理性能、热性能、微观结构和氧化稳定性进行表征,考察卵磷脂与SMS质量比对菜籽油凝胶凝胶特性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

菜籽油,益海嘉里特种油脂(上海)有限公司;山梨醇酐单硬脂酸酯(食品级)、卵磷脂(食品级,纯度>95%),银川昕泰昌盛生物公司;乙醇、三氯甲烷、冰乙酸、碘化钾、硅油、硫代硫酸钠、可溶性淀粉等均为分析纯,天津市大茂化学试剂厂。

#### 1.1.2 仪器与设备

DF-101S数显恒温磁力搅拌器,苏州威尔实验用品有限公司;TDL-5-A型离心机,上海安宁科

学仪器厂;HR-1 Discovery流变仪,美国TA公司;ML204分析天平,梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司;TA-XT Plus质构仪,英国Stable Micro Systems公司;Smart Lab X-射线衍射仪,日本理学株式会社;Perkin Elmer DSC 8500差示扫描量热仪、Spectrum TWO傅里叶红外光谱仪,珀金埃尔默企业管理(上海)有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 菜籽油凝胶的制备

参照王伟宁等<sup>[9]</sup>的方法并适当调整,先将菜籽油在水浴锅中加热至80℃,然后加入不同质量比的卵磷脂和SMS(卵磷脂和SMS总质量为菜籽油质量的28%),恒温搅拌直到凝胶剂完全溶解于菜籽油中形成澄清的溶液,取出置于常温下冷却,然后于25℃培养箱中孵化3d,备用。

共设计5个不同凝胶剂配比的样品,如表1所示。

表1 不同卵磷脂与SMS质量比的菜籽油凝胶分组

组别	卵磷脂与SMS质量比
SL 0	0:10
SL 1	1:9
SL 2	2:8
SL 3	3:7
SL 4	4:6

#### 1.2.2 析油率的测定

参照文献[10]的方法测定析油率。称量空离心管的质量,称取1g左右的菜籽油凝胶样品于离心管中,于10 000 r/min离心15 min,取出离心管后在滤纸上倒置5 min沥干。通过下式计算析油率( $y$ )。

$$y = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m$ 为离心管的质量,g; $m_1$ 为离心前离心管和菜籽油凝胶样品的质量,g; $m_2$ 为离心后离心管和菜籽油凝胶样品的质量,g。

#### 1.2.3 硬度的测定

参照Zhang等<sup>[11]</sup>的方法测定硬度。于50 mL烧杯中制备菜籽油凝胶,置于室温、阴凉处2 h后测试。测试条件:P5探针下压模式,测前速率2 mm/s,测中速率1 mm/s,测后速率2 mm/s,触发力2 g,下压深度10 mm。

#### 1.2.4 流变学分析

参照Aguilar-Zárate等<sup>[12]</sup>的方法并适当调整。取适量菜籽油凝胶样品于样品台上,用直径为40 mm的平板,间隙设置为1 mm,在25℃恒定的低应变(0.01%)水平下,对菜籽油凝胶进行小变形频

率扫描,测定弹性模量( $G'$ )和黏性模量( $G''$ )随频率变化的曲线,频率范围为0.1~10 Hz。

### 1.2.5 X射线衍射(XRD)分析

参照 Meng 等<sup>[13]</sup>的方法并适当调整。取适量样品平铺于检测片上的圆孔内,用 X-射线衍射仪测定。衍射条件为铜靶,工作电压 40 kV,电流 40 mA,  $2\theta$  扫描范围  $5^\circ \sim 45^\circ$ ,扫描速度  $8^\circ/\text{min}$ 。用 Jade 6.5 计算样品的晶面间距( $d$ -间距)值、半峰宽值(FWHM)和曲线下面积(AUC)。

### 1.2.6 差示扫描量热(DSC)分析

参照文献[14]的方法进行分析。精密称取 10 mg 菜籽油凝胶样品,先于  $20^\circ\text{C}$  平衡,再以  $30^\circ\text{C}/\text{min}$  加热到  $120^\circ\text{C}$  维持 10 min,然后以  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  冷却到  $20^\circ\text{C}$  并保持 20 min,再以  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  加热到  $100^\circ\text{C}$ ,  $\text{N}_2$  流速为  $20 \text{ mL}/\text{min}$ 。

### 1.2.7 傅里叶红外光谱(FTIR)分析

卵磷脂和 SMS 使用 KBr 压片法测定<sup>[13]</sup>,按一定比例称取样品粉末和 KBr 粉末,于玛瑙研钵中研磨,再按照标准程序制备压片并测定。对于菜籽油及菜籽油凝胶样品<sup>[15]</sup>,先将 KBr 研磨并制备空的 KBr 薄片,再将熔融的菜籽油及菜籽油凝胶样品均匀涂抹到薄片上,冷却一定时间直到熔融的菜籽油凝胶样品形成稳定的油凝胶再进行测定。数据采集范围为  $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。

### 1.2.8 氧化稳定性分析

采用加速贮藏实验法<sup>[16]</sup>分析氧化稳定性。分别取适量菜籽油及菜籽油凝胶样品,置于  $(60.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$  烘箱中,每隔 5 d 取样测定其过氧化值,至 20 d 结束。参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》测定过氧化值。

### 1.2.9 统计分析

实验基于 5 次独立样品测定,所得数据用 SPSS v.26 进行统计分析。数据以“平均值 $\pm$ 标准差”表示;比较数据的显著性, $p < 0.05$  为差异显著。用 Origin 2021 进行基础数据处理并制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 菜籽油凝胶的析油率和硬度

硬度反映了油凝胶的机械强度,硬度越高说明油凝胶成型越好;析油率是评价油凝胶固体性质的重要指标之一<sup>[17]</sup>。不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的析油率与硬度见图 1。

从图 1 可以看出,卵磷脂与 SMS 质量比对菜籽油凝胶硬度和析油率具有显著影响( $p < 0.05$ )。随着卵磷脂添加量的增加,菜籽油凝胶的析油率先逐渐降低然后趋于稳定,最后突然增加。菜籽油凝胶的析油率与硬度成反比<sup>[18]</sup>,当卵磷脂与 SMS 质量

比为 0:10 时,油凝胶表现出较弱的析油率,硬度为  $83.57 \text{ g}$ ;在卵磷脂与 SMS 质量比为 2:8 时,析油率最低,硬度最高;在卵磷脂与 SMS 质量比为 4:6 时,析油率最高,硬度最低,说明机械强度最弱,这种不良的凝胶行为可能是由于凝胶剂中卵磷脂含量高,无法将油截留在系统中,也可能是由于卵磷脂和菜籽油之间的相互作用而引起的<sup>[19]</sup>。

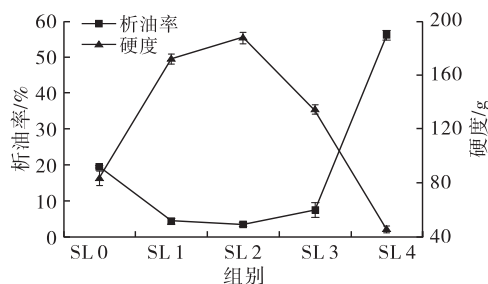


图 1 不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的析油率与硬度

### 2.2 菜籽油凝胶的流变学性质

$G'$  表示剪切形变循环过程中能够恢复的能量,也叫储能模量,表征体系的固体性质; $G''$  表示剪切形变循环过程中所消耗的能量,也叫耗能模量,表征体系的液体性质。当  $G'$  大于  $G''$ ,体系发生弹性形变,呈固体状;反之,体系发生黏性形变,呈液体状<sup>[20]</sup>。图 2 为 5 种菜籽油凝胶的频率扫描结果。

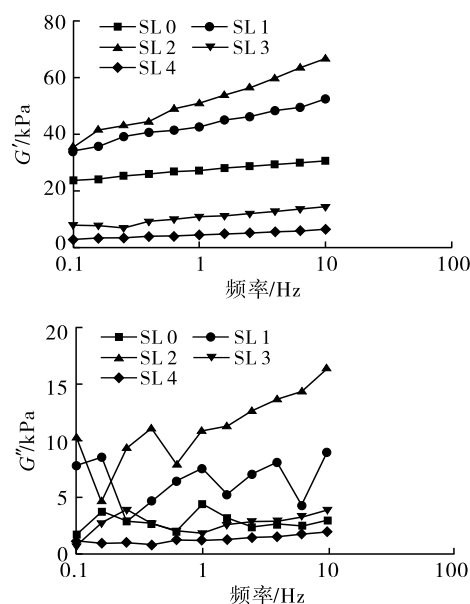


图 2 不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的频率扫描曲线

由图 2 可知,所有菜籽油凝胶的  $G'$  都随着频率的增加而增加,且  $G'$  均高于  $G''$ ,即凝胶体系不受振荡频率的影响,体系内部形成稳定的三维网状结构,样品表现为真凝胶、类固体状态。SL0 的  $G'$  介于 5 种样品中间,凝胶强度较弱;SL2 的  $G'$  最高,表明其凝胶强度最高;SL4 的  $G'$  最低,表明其凝胶强度最

低。析油率与流变学有关,总体随着  $G'$  降低析油率增加<sup>[3]</sup>,SL 2 的  $G'$  和  $G''$  都明显大于其他样品,所以其析油率最低,说明卵磷脂与 SMS 质量比为 2:8 时菜籽油凝胶的物理性质最好。

### 2.3 菜籽油凝胶的热性能

图 3 为不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的 XRD 图谱,表 2 为不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶及其组分的  $d$ -间距、FWHM 和 AUC。

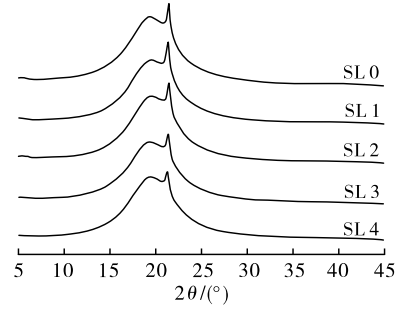


图 3 不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的 XRD 图谱

表 2 不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶及其组分的  $d$ -间距、FWHM 和 AUC

样品	$d$ -间距/Å		FWHM		AUC	
	$2\theta = 21^\circ$	$2\theta = 19^\circ$	$2\theta = 21^\circ$	$2\theta = 19^\circ$	$2\theta = 21^\circ$	$2\theta = 19^\circ$
SMS	4.112 0	-	1.900	-	6 027.7	-
SL 0	4.139 1	1.008	0.402	9 498.1	18 073.2	22 170.2
SL 1	4.154 5	0.998	0.468	8 521.2	15 795.1	12 308.5
SL 2	4.137 2	1.047	0.414	8 864.6	10 064.1	8 235.0
SL 3	4.160 1	1.027	0.408	8 235.0	8 176.0	0.397
SL 4	4.167 9	1.043	0.397	8 176.0	0.397	8 176.0

由图 3 和表 2 可知,在大角度范围内,菜籽油凝胶的衍射峰几乎相同,在  $2\theta$  为  $19^\circ$  处有 1 个宽峰,在  $2\theta$  为  $21^\circ$  处有 1 个尖峰。SMS 的晶面间距 ( $d$ -间距) 值为 4.112 0 Å,而所有的菜籽油凝胶样品均在 4.13 ~ 4.17 Å 处显示主峰,这与 Sagiri 等<sup>[21]</sup> 研究 SMS 芥子油凝胶在 XRD 图谱中的  $d$ -间距结果基本一致。菜籽油凝胶与 SMS 的主要峰的位置和  $d$ -间距均相同,表明 SMS 凝胶分子以相同的分子排列形式存在于菜籽油凝胶中。FWHM 依赖于样品的结晶度,而结晶度又依赖于凝胶分子之间形成有序结构的相互作用。FWHM 越低,结晶度越高<sup>[22]</sup>。 $2\theta$  为  $21^\circ$  处峰的 FWHM 低于  $2\theta$  为  $19^\circ$  处峰的,说明其结晶度较高,非晶性较弱,因此选择  $2\theta$  为  $21^\circ$  处峰来比较不同菜籽油凝胶的结晶行为。在未添加卵磷脂时,SL 0 的 FWHM 为 0.402,随着卵磷脂的添加,SL 1 ~ SL 4 的 FWHM 从 0.468 下降到 0.397。较高的 AUC 表示较低的结晶性质<sup>[3]</sup>,AUC 结果与 FWHM 结果相似,SL 0 的 AUC 为 18 073.2,随着卵磷脂比例的增加,SL 1 ~ SL 4 的 AUC 值从 22 170.2 下降到 10 064.1,FWHM 与 AUC 的降低说明卵磷脂与 SMS 复合有效促进了菜籽油凝胶的结晶。

### 2.4 菜籽油凝胶的热力学性质

采用 DSC 分析菜籽油凝胶在 20 ~ 100 °C 范围内的热性质。图 4 为不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的熔融和结晶曲线,表 3 为不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的热力学参数。

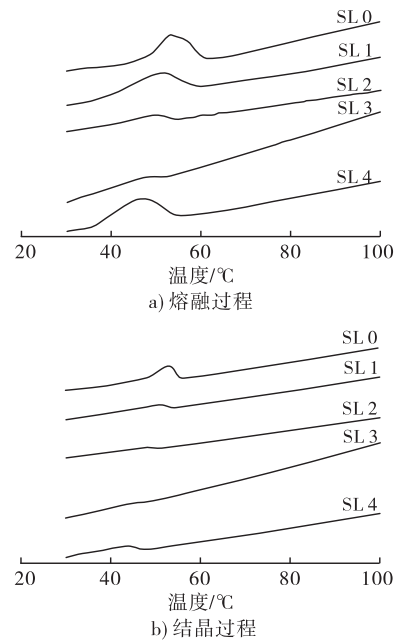


图 4 不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的 DSC 热分析图

表 3 不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶的热力学参数

样品	熔融			结晶		
	$T_{on}/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(J/g)$	$T_{on}/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(J/g)$
SL 0	46.7	53.2	3.85	47.3	45.1	0.20
SL 1	45.6	51.8	2.70	44.5	41.5	0.07
SL 2	44.2	50.2	0.15	39.5	37.0	0.04
SL 3	42.3	49.1	0.09	34.5	32.3	0.02
SL 4	36.9	47.1	1.26	35.0	29.8	0.09

由图4可知,菜籽油凝胶体系的峰为单峰,通过加热每组菜籽油凝胶的热谱图都显示出1个较宽的吸热峰,通过冷却都显示出1个较宽的放热峰。几种菜籽油凝胶都在较宽的温度范围内观察到相应的熔融和结晶过程,说明溶胶-凝胶和凝胶-溶胶的相变不是瞬时过程,而是连续过程。当卵磷脂比例增加时,菜籽油凝胶吸热峰向低温方向移动,起始温度( $T_{on}$ )从46.7℃移动到36.9℃,根据峰面积计算的焓( $\Delta H$ )分别为3.85、2.70、0.15、0.09 J/g和1.26 J/g,逐渐减少后又增加(见表3),这与在放热状态的现象相似。在包含卵磷脂和SMS两种成分的菜籽油凝胶中,只能观察到一个热现象,这表明各个组分之间不存在相分离<sup>[18]</sup>。然而,热现象行为是由于卵磷脂的浓度驱动的,菜籽油凝胶中卵磷脂的增加导致相转变过程中起始温度( $T_{on}$ )、结晶温度( $T_p$ )和焓( $\Delta H$ )的降低,使得热力学稳定性也降低。

## 2.5 菜籽油凝胶的结构

图5为卵磷脂、菜籽油、不同卵磷脂与SMS质量比菜籽油凝胶FTIR图。

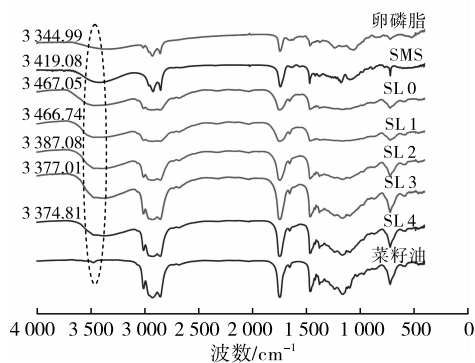


图5 卵磷脂、菜籽油、不同卵磷脂与SMS质量比菜籽油凝胶FTIR图

由图5可看出:菜籽油凝胶具有几个特征吸收带,包括以3000~3600 $\text{cm}^{-1}$ 为中心的峰,该峰与O—H基团的拉伸有关;在2800~3000 $\text{cm}^{-1}$ 的峰被认为是 $\text{CH}_3$ 特征峰;位于1600~1850 $\text{cm}^{-1}$ (酰胺I带)的峰被认为是C=O拉伸振动;在1500~1600 $\text{cm}^{-1}$ (酰胺II带)之间的峰对应于C—N拉伸和N—H弯曲;在1200~1350 $\text{cm}^{-1}$ (酰胺III带)的峰与平面内N—H扭曲,N—N拉伸和C—H、N—H变形振动有关;在650~1350 $\text{cm}^{-1}$ 的峰与X—Y、X—H变形振动有关。除菜籽油之外,卵磷脂、SMS和菜籽油凝胶均在3300~3600 $\text{cm}^{-1}$ 区间内有羟基的吸收峰,表明存在O—H基团的拉伸,这说明凝胶剂存在分子内或分子间氢键,从而形成凝胶网络结构<sup>[21]</sup>。研究发现,SMS和卵磷脂等相对分子质量

较低的化合物通过非共价相互作用进行分子自组装,通过氢键的作用使液态油呈胶状<sup>[22]</sup>。菜籽油在3007 $\text{cm}^{-1}$ 的峰代表=C—H拉伸;菜籽油和凝胶剂在2924 $\text{cm}^{-1}$ 和2853 $\text{cm}^{-1}$ 的峰为饱和碳氢键的伸缩振动区,代表 $\text{CH}_3$ 和 $\text{CH}_2$ 的C—H拉伸;在1746 $\text{cm}^{-1}$ 的吸收峰证实了C=O拉伸的存在,这与菜籽油相对应;菜籽油和凝胶剂在1466 $\text{cm}^{-1}$ 的峰代表 $\text{CH}_3$ 和 $\text{CH}_2$ 基团的C—H弯曲;在1165 $\text{cm}^{-1}$ 的峰对应于与菜籽油和凝胶剂相关的C—O—H和C—O—C的C—O拉伸。这一结果与Swe等<sup>[23]</sup>研究的硅油/SMS芝麻油凝胶的键位大致相同,这表明油凝胶分子内部羟基之间存在分子间氢键,导致凝胶网络的形成。

## 2.6 菜籽油凝胶的氧化稳定性

研究了菜籽油凝胶在加速氧化条件下的氧化稳定性,并与菜籽油进行了比较,结果如图6所示。

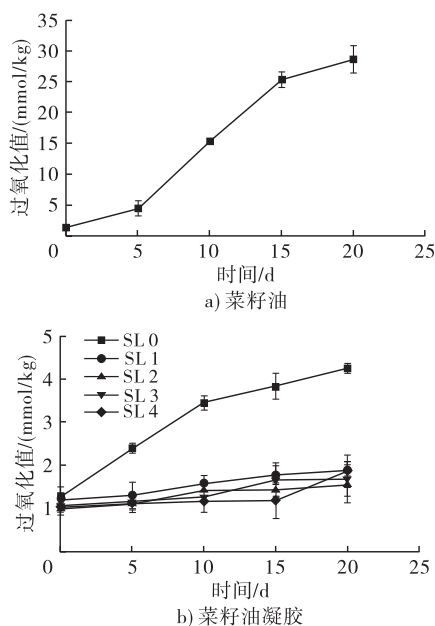


图6 菜籽油与菜籽油凝胶的氧化稳定性

由图6可知,在加速氧化贮藏过程中菜籽油的氧化速度非常快,20 d时其过氧化值升高到28.68 mmol/kg,而菜籽油凝胶的过氧化值稳定在1.42~4.25 mmol/kg之间,说明菜籽油凝胶具有较好的氧化稳定性。随着贮存时间的延长,菜籽油凝胶的过氧化值均有所增加,由于卵磷脂本身具有抗氧化特性<sup>[24]</sup>,随着卵磷脂比例增加,菜籽油凝胶的过氧化值有下降的趋势。因此,可以推测,卵磷脂在油凝胶中形成的网络结构在一定程度上延缓了油脂的氧化。

## 3 结论

通过研究卵磷脂与SMS质量比对菜籽油凝胶理化性质、微观结构及氧化稳定性的影响可知,卵磷脂与SMS质量比为2:8时菜籽油凝胶的析油率最

低、硬度最高;不同卵磷脂与 SMS 质量比菜籽油凝胶  $G'$  均高于  $G''$ , 其中卵磷脂与 SMS 质量比为 2:8 时表现出的凝胶特性最优;随着卵磷脂比例的增加,菜籽油凝胶的热稳定性降低,但是其氧化稳定性提高并且结晶状态良好。综上,卵磷脂与 SMS 复合作为凝胶剂可有效固化菜籽油成功构建菜籽油凝胶体系,其中卵磷脂与 SMS 质量比为 2:8 时形成的菜籽油凝胶的凝胶特性最好。

#### 参考文献:

- [1] LUO S Z, HU X F, JIA Y J, et al. Camellia oil - based oleogels structuring with tea polyphenol - palmitate particles and citrus pectin by emulsion - templated method: preparation, characterization and potential application[J]. Food Hydrocolloid, 2019, 95:76 - 87.
- [2] PATEL A R, DEWETTINCK K. Edible oil structuring: an overview and recent updates [J]. Food Funct, 2016, 7 (1): 20 - 29.
- [3] SILVA T L T, ARELLANO D B, MARTINI S. Interactions between candelilla wax and saturated triacylglycerols in oleogels[J]. Food Res Int, 2019, 121:900 - 909.
- [4] CUI L Q, FAN J, SUN Y F, et al. The prooxidant activity of salts on the lipid oxidation of lecithin - stabilized oil - in - water emulsions[J]. Food Chem, 2018, 252:28 - 32.
- [5] ZHOU X X, LIN H H, ZHU S C, et al. Textural, rheological and chemical properties of surimi nutritionally - enhanced with lecithin[J/OL]. LWT - Food Sci Technol, 2020, 122: 108984 [2021 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108984>.
- [6] SINGH V K, PRAMANIL K, RAY S S, et al. Development and characterization of sorbitan monostearate and sesame oil - based organogels for topical delivery of antimicrobials[J]. AAPS Pharm Sci Tech, 2015, 16(2):293 - 305.
- [7] PERNETTI M, VAN MALSSSEN K, KALNIN D, et al. Structuring edible oil with lecithin and sorbitan tri - stearate [J]. Food Hydrocolloid, 2007, 21(5/6): 855 - 861.
- [8] BARBOSA K M, CARDOSO L P, RIBEIRO A P B, et al. Crystallization of low saturated lipid blends of palm and canola oils with sorbitan monostearate and fully hydrogenated palm oil[J]. J Food Sci Technol, 2018, 55 (3): 1104 - 1115.
- [9] 王伟宁, 王莹, 于洋, 等. 甘蔗蜡制备稻米油基油凝胶及其相关性质[J]. 食品科学, 2021, 42(2):17 - 22.
- [10] LÓPEZ - MIRANDA J, PÉREZ - JIMÉNEZ F, ROS E, et al. Olive oil and health: summary of the II international conference on olive oil and health consensus report, Jaén and Córdoba (Spain) 2008[J]. Nutr Metab Cardiovasc, 2010, 20(4):284 - 294.
- [11] ZHANG X W, WANG W H, WANG Y N, et al. Effects of nanofiber cellulose on functional properties of heat - induced chicken salt - soluble meat protein gel enhanced with microbial transglutaminase[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 84:1 - 8.
- [12] AGUILAR - ZÁRATE M, MACIAS - RODRIGUEZ B A, TORO - VAZQUEZ J F, et al. Engineering rheological properties of edible oleogels with ethylcellulose and lecithin[J]. Carbohydr Polym, 2019, 205:98 - 105.
- [13] MENG Z, QI K Y, GUO Y, et al. Effects of thickening agents on the formation and properties of edible oleogels based on hydroxypropyl methyl cellulose[J]. Food Chem, 2018, 246:137 - 149.
- [14] 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 Res Int, 2018, 111:168 - 177.
- [15] 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.
- [16] 张秋月. 含茶多酚油凝胶的制备及抗氧化性的检测[D]. 北京:北京化工大学, 2014.
- [17] YANG Q, WANG Y R, LI - SHA Y J, et al. Physicochemical, structural and gelation properties of arachin - basil seed gum composite gels: effects of salt types and concentrations [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 113: 106545 [2021 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106545>.
- [18] GAUDINO N, GHAZANI S M, CLARK S, et al. Development of lecithin and stearic acid based oleogels and oleogel emulsions for edible semisolid applications[J]. Food Res Int, 2019, 116:79 - 89.
- [19] XIA W Y, MA L, CHEN X K, et al. Physicochemical and structural properties of composite gels prepared with myofibrillar protein and lecithin at various ionic strengths [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 82:135 - 143.
- [20] PAN J J, TANG L R, DONG Q X, et al. Effect of oleogelation on physical properties and oxidative stability of camellia oil - based oleogels and oleogel emulsions [J/OL]. Food Res Int, 2021, 140:110057 [2021 - 10 - 09]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110057>.
- [21] SAGIRI S S, KASIVISWANATHAN U, SHAW G S, et al. Effect of sorbitan monostearate concentration on the thermal, mechanical and drug release properties of oleogels [J]. Korean J Chem Eng, 2016, 33(5):1720 - 1727.
- [22] OKURO P K, TAVERNIER I, BIN SINTANG M D, et al. Synergistic interactions between lecithin and fruit wax in oleogel formation [J]. Food Funct, 2018, 9(3): 1755 - 1767.
- [23] SWE M T H, ASAVAPICHAYONT P. Effect of silicone oil on the microstructure, gelation and rheological properties of sorbitan monostearate - sesame oil oleogels [J]. Asian J Pharm Sci, 2018, 13(5):485 - 497.
- [24] 步文磊, 赵显峰, 荫士安, 等. 辅酶 Q10、大豆甾元以及卵磷脂对小鼠体内抗氧化体系的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 256 - 259.