

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.11.019

植物油脂凝胶的氧化稳定性及货架期预测

Study on oxidation stability and shelf life of oleogel

刘龙龙¹ 王家镛¹ 陈治同¹LIU Long-long¹ WANG Jia-bin¹ CHEN Zhi-tong¹赵月莹¹ 张 华^{1,2} 崔明勋^{1,2}ZHAO Yue-ying¹ ZHANG Hua^{1,2} CUI Ming-xun^{1,2}

(1. 延边大学农学院食品与生物科学系, 吉林 延吉 133002;

2. 东北寒区肉牛科技创新教育部工程研究中心〔延边大学〕, 吉林 延吉 133002)

(1. Department of Food and Biological Science, College of Agriculture, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China; 2. Engineering Research Center of North-East Cold Region Beef Cattle Science & Technology Innovation, Ministry of Education [Yanbian University], Yanji, Jilin 133002, China)

摘要:目的:解决植物油替代固体脂肪易氧化且反式脂肪酸含量高的问题。方法:以谷甾醇/大豆磷脂为凝胶剂制备大豆油和菜籽油凝胶代替固体脂肪,通过初、次级氧化产物及脂肪酸组成变化研究其氧化稳定性,通过 X-射线衍射观察结构稳定性,并采用 OXITEST 法预测其货架期。结果:大豆油凝胶和菜籽油凝胶的初、次级氧化产物含量均低于原油;植物油及其凝胶在贮藏过程中主要发生多不饱和脂肪酸的氧化,且凝胶的脂肪酸含量变化较小;X-射线衍射结果显示大豆油凝胶和菜籽油凝胶都具有稳定的 β 和 β' 晶型结构;OXITEST 测定结果表明,油脂凝胶能够有效延长油脂的氧化诱导期(IP),并进一步延长油脂的货架期。结论:油脂凝胶具有良好的结构稳定性和氧化稳定性,能有效延长植物油的货架期,可作为固体脂肪的有效替代品。

关键词:大豆油;菜籽油;油脂凝胶;氧化稳定性;货架期;OXITEST 法

Abstract: Objective: To solve the problem of easily oxidized and high content of trans fatty acid the vegetable oil instead of solid fat. **Methods:** Soybean oil and rapeseed oil gels were prepared using sitosterol/soybean phospholipid as gel agent to replace solid fat. The oxidation stability was studied by the changes of primary oxidation products and fatty acid composition. The structural sta-

bility was observed by X-ray diffraction, and the shelf life was predicted by OXITEST method. **Results:** The contents of primary and secondary oxidation products of soybean oil gel and rapeseed oil gel were lower than those of crude oil. The oxidation of polyunsaturated fatty acids occurred mainly in vegetable oils and their gels during storage, and the fatty acid content of the gels changed little. The X-ray diffraction results showed that both soybean oil gel and rapeseed oil gel had stable β and β' crystal structure. The results of OXITEST showed that the lipid gel could effectively prolong the oxidation induction period (IP) and further prolong the shelf life of the lipid. **Conclusion:** Lipid gel has good structural stability and oxidation stability, can effectively prolong the shelf life of vegetable oil, and can be an effective substitute for solid fat.

Keywords: soybean oil; rapeseed oil; oleogel; oxidation stability; Shelf life; OXITEST method

脂类是日常生活所必需的营养物质之一,其中固体脂肪在食品加工中具有赋予产品特殊的口感,延长保质期等特点^[1]。以牛油、猪油等动物油为基底的固体脂肪具有理想的塑性范围,但由于动物油的脂肪酸组成的缺陷,容易出现返砂晶体,破坏产品的稳定性和延展性^[2-3]。目前大部分应用于食品中的固体脂肪由植物油通过加氢催化制成,氢化使得油脂的饱和度降低,从而使油脂硬化,但氢化不彻底会产生大量的反式脂肪酸(TFAs)^[4]。摄入过量反式脂肪酸会增加患心血管疾病、肥胖、炎症、内质网应激等疾病的风险^[5]。

近年来,出于对健康和营养的需求,人们迫切寻找一种 TFAs 含量低且稳定性高的固体脂肪应用于食品加工

基金项目:高等学校学科创新引智计划资助(编号:D20034)

作者简介:刘龙龙,男,延边大学在读硕士研究生。

通信作者:张华(1979—),女,延边大学讲师,博士。

E-mail: zhanghua@ybu.edu.cn

崔明勋(1979—),男,延边大学副教授,博士。

E-mail: 1501967915@qq.com

收稿日期:2021-07-13

中。油脂凝胶是一种由具有三维结构的凝胶剂和液态植物油组成的固体脂质体系^[3],其制备条件温和且不会生成 TFAs。天然植物油多含丰富的多不饱和脂肪酸,而多不饱和脂肪酸具有治疗心血管疾病、抗炎、抗癌、抗衰老和改善老年痴呆等功能^[6-9],可作为制备油脂凝胶的基油。但植物油贮藏过程中易发生氧化酸败。目前,用于延缓油脂氧化酸败的方法一般为添加天然或合成抗氧化剂,天然抗氧化剂可能带入抗氧化剂本身的气味,影响油脂的口感;而合成抗氧化剂的安全性一直颇受质疑^[10]。而且添加抗氧化剂无法改变液态油的塑性。罗晶等^[11]研究发现,12-羟基硬脂酸有机凝胶剂制备的大豆油凝胶不但具有稳定的结构,而且能够有效减缓油脂氧化;Han 等^[12]研究表明卵磷脂和谷甾醇联合可成功制备植物油凝胶,且其具有良好的稳定性。不仅如此,Pan 等^[13]的研究表明单月桂酸甘油酯制备的山茶油凝胶过氧化值(POV)和硫代巴比妥酸值(TBA)较低,氧化稳定性较高。因此,油脂凝胶可作为固体脂肪的有效替代品,且能够提高油脂本身的稳定性。油脂凝胶最大的难题在于寻找新型的可食用凝胶剂,谷甾醇和卵磷脂不仅价格低廉、可食用,而且磷脂的加入解决了单一小分子无法形成凝胶、溶解度低的问题,能够形成稳定的油脂凝胶^[14]。

目前,对于谷甾醇与卵磷脂作为凝胶剂制备油脂凝胶的结构稳定性和能否延长货架期的研究较少,因此研究拟以大豆油(SBO)、菜籽油(RSO)为基油,选用谷甾醇/卵磷脂为凝胶剂来制备大豆油凝胶(SBG)和菜籽油凝胶(RSG),与牛油(BT)、SBO 和 RSO 作对比,通过计算 POV 值和 TBA 值对所制备的 2 种油脂凝胶在贮藏过程中的氧化稳定性进行研究,通过气相色谱(GC)和 X 射线衍射(XRD)监测贮藏过程中脂肪酸和晶型结构的变化来研究其氧化机制及结构稳定性;并采用 OXITEST 方法对油脂凝胶货架期进行预测,以期提高植物油的货架期,为油脂凝胶的贮藏和加工提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

菜籽油(低芥酸、三级油)、大豆油(三级油)、牛油:市售;

谷甾醇(>75%)、卵磷脂(>90%)、正丁醇、正己烷:色谱纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

三氯甲烷、冰乙酸、硫代硫酸钠、淀粉、2'-硫代巴比妥酸、氘代氯仿、氢氧化钠、甲醇、三氟化硼:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:ME104 型,梅特勒—托利多国际有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-1246 型,常州鸿泽实验科技有

限公司;

紫外可见分光光度计:UV-1800 型,上海美谱达仪器有限公司;

核磁共振仪:AV-600 型,瑞士布鲁克公司;

X-射线衍射仪:D/Max 2200VPC 型,日本理学电子有限公司;

气相—质谱仪:2010PLUS 型,日本岛津公司;

油脂氧化分析仪:OXITEXT 型,北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品的制备 根据文献^[15]修改如下:称取 20 mL 样品油,添加油脂质量分数为 12% 的谷甾醇与卵磷脂形成的低分子量复合凝胶剂($m_{\text{谷甾醇}} : m_{\text{卵磷脂}}$ 为 6 : 4),100 °C 下磁力搅拌 30 min,使凝胶剂充分溶解于油中,于 4 °C 冰箱中贮藏 24 h。称取 100 g 制备好的样品装在统一大小的敞口棕色瓶中,置于 25 °C 的恒温培养箱中贮藏 35 d,每隔 5 d 进行试验。

1.3.2 POV 测定 按 GB 5009.227—2016 执行。

1.3.3 TBA 测定 按 GB/T 35252—2017 执行。

1.3.4 脂肪酸测定

(1) 甲酯化:根据仇宏图等^[16]的方法并修改,称取 30 mg 样品,加入 1.5 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠甲醇溶液,摇匀,95 °C 以上反应 3 min,冷却,再加入 2 mL 体积分数为 14% 的 BF₃ 甲醇溶液,95 °C 下反应 2 min,冷却,加入 1 mL 饱和氯化钠和 2 mL 正己烷,提取脂肪酸甲酯经过无水硫酸钠干燥后用于气相分析。

(2) GC 条件:毛细色谱柱 DM-5(30 m × 250 μm, 0.25 μm)。进样口温度 220 °C;分流比 10 : 1;隔垫吹扫 3 mL/min。程序升温:初始温度 60 °C,保持 3 min,以 5 °C/min 的升温速率升至 150 °C,再以 10 °C/min 上升至 250 °C,保持 30 min。离子源温度 200 °C,连接器温度 220 °C,柱流量 1 mL/min,总流量 14 mL/min。

1.3.5 X-射线衍射(XRD)测定 根据 Judde 等^[17]方法并修改,取适量的样品平铺在检测片上,仪器测试条件设定为:Cu-K α 放射源($\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$),工作电压为 40 kV,工作电流为 40 mA,2 θ 角扫描范围 10.0°~30.0°,扫描步长为 0.02°,扫描速率为 2 °C/min,发射和防反射狭缝 1 mm,接受狭缝 0.1 mm,测试温度为 25 °C。

1.3.6 氧化稳定性和货架期测定 采用 OXITEST 法对油脂及其凝胶(准确称取 10 g)进行分析,纯氧压力 0.6 MPa,90 °C 恒温,使用两个不同的反应室做重复试验。氧化稳定性通过诱导期(IP)值反映。对油脂及其凝胶在 3 种不同温度(70,80,90 °C)下进行加速货架期试验。使用仪器自带的 OXISoft™ 程序,通过图解法自动计算氧化曲线的 IP 值及其货架期。

1.3.7 数据统计与分析 数据均以“平均值±标准误差”

表示,平行试验至少 3 次,采用 Excel 2016 进行数据分析,采用 Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 油脂及其凝胶的 POV 和 TBA 值变化

由图 1 可知,随着贮藏时间的延长,动植物油脂及其凝胶的过氧化值整体上呈上升趋势。RSO 的过氧化值变化最大。至贮藏末时,RSO 过氧化值达到 4.315 mmol/kg, SBO 为 1.607 mmol/kg, RSG 为 3.130 mmol/kg, SBO 为 1.210 mmol/kg, BT 为 0.478 mmol/kg。这是因为菜籽油中不饱和脂肪酸含量高于大豆油的,较易发生氧化反应。而动物油与植物油相比,含有更高的饱和脂肪酸,因此有更好的氧化稳定性。油脂凝胶的 POV 值较原油低,可能是因为 β -谷甾醇与卵磷脂发生过氧化自由基反应,并猝灭单一态的氧分子和对卵磷脂双分子层进行排序而发挥其抗氧化作用,同时, β -谷甾醇分子中的羟基和卵磷脂分子中的脂肪酸酯的羰基间可形成氢键,使得油脂过氧化被抑制^[18]。贮藏过程中 5 种样品的 TBA 值变化趋势基本与 POV 值一致,其值大小顺序为 RSO>SBO>RSG>SBG>BT(见图 2)。0~20 d, TBA 值无明显变化,主要是因为前 20 d 产生的初级氧化产物(主要为氢过氧化物)

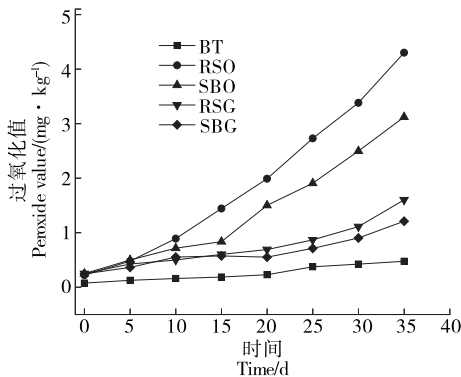


图 1 贮藏过程中油脂及其凝胶的过氧化值

Figure 1 POV of oils and their oleogels during storage

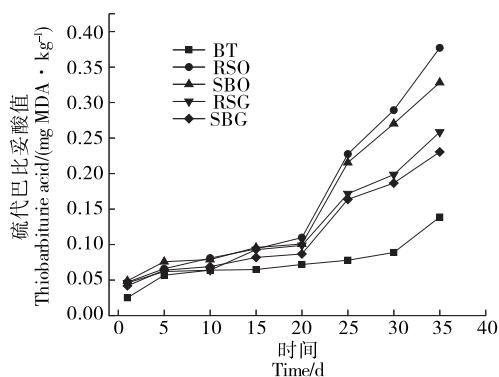


图 2 贮藏过程中油脂及其凝胶的 TBA 值

Figure 2 TBA value of oils and their oleogels during storage

少,未能产生大量次级氧化产物。脂肪氧化链反应的传递是一种自由基反应,若这一传递过程受到阻碍则会导致次级氧化产物生成降低。油脂及其凝胶 TBA 值比较结果表明油脂凝胶形成的稳定网络结构能够对脂质自由基的传递起到一定的“阻碍”效果,即其能有效抑制次级氧化产物的产生^[19]。

2.2 脂肪酸组分和含量变化

由表 1 可知,RSO 和 SBO 制备成 RSG 和 SBG 后脂肪酸组成无明显差异,这一结果表明油脂凝胶的制备并不会对油脂的脂肪酸造成破坏。另外,随着氧化时间的延长,SBO 和 RSO 中主要的不饱和脂肪酸 $C_{18:1}$, $C_{18:2}$, $C_{18:3}$ 的含量比 RSG 和 SBG 中的下降幅度更大,这是因为油脂凝胶比油脂更加稳定。BT 中 $C_{18:3}$ 含量远低于 SBO 和 RSO 中的,表明脂肪酸组成的不同与 BT 有更高的氧化稳定性有极大的关系,诸多学者^[20-22]研究表明 $C_{18:1}$, $C_{18:2}$, $C_{18:3}$ 同时存在时, $C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 首先开始氧化,且 $C_{18:2}$ 和 $C_{18:3}$ 含量越高,氧化速度越快,这与试验结果完全一致。在贮藏过程中 BT 的各种脂肪酸相对含量变化较小,表明它具有很强的脂肪酸保护机制,这可能与它独特的甘油三酯组成和脂肪酸排列有关。

由图 3 可知,两个主成分的总变异为 99.1%,其中 PC1 为 64.1%,PC2 为 35.0%,两个主成分基本代表了样品的主要特征信息。单从脂肪酸含量并不能够有效地区分油脂凝胶和原油,表明油脂凝胶的制作不会对脂肪酸造成破坏。

2.3 XRD 分析

如图 4 所示,液体油 RSO 和 SBO 无晶体结构,而在油脂凝胶系统中,RSG 和 SBG 衍射峰极为相似,说明油脂类型对凝胶的结构并无很大影响,与李丹等^[23]研究结果一致。在第 0~30 天时,RSG 与 SBG 中主要的晶型的短间距值均集中在 0.590,0.460,0.420,0.386 nm 附近;而 BT 的短间距值主要集中在 0.420,0.386 nm 附近,表明凝胶和动物油之间存在的晶型并不完全一致,这也是 BT 的氧化稳定性不同于 SBG 和 RSG 的原因之一。经典油脂学认为 0.460 nm 附近的短间距值为 β 晶型的特征衍射峰,而 0.380~0.420 nm 的为 β' 晶型,在凝胶体系中出现衍射信号可认为是 β 和 β' 晶型的衍射峰,具有这两种晶型的凝胶口感好,熔点较高,稳定性也好^[24]。放置 30 d RSG 和 SBG 晶型结构并未发生改变,说明凝胶在氧化过程中仍然能够保持结构的稳定。

2.4 氧化稳定性及其货架期

90 °C 下,油脂及其凝胶的 IP 值大小依次为 RSG>SBG>RSO>BT>SBO(图 5)。这一结果表明凝胶比油脂具有更好的氧化稳定性。此外,利用 OXITEST 法在高温高压(70,80,90 °C;0.6 MPa)条件下对油脂货架期进行预测,其结果如表 2 所示,RSG 与 SBG 相比,SBG 具有更

表 1 油脂及其凝胶在贮藏过程中的脂肪酸含量变化[†]
Table 1 Fatty acid changes of fats and their oleogels during storage

脂肪酸	BT			RSO			SBO		
	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d
C _{14:0}	5.09±0.01	5.27±0.01	5.49±0.01	0.16±0.00	0.46±0.01	1.18±0.01	ND	ND	ND
C _{16:0}	29.31±0.02	29.71±0.01	30.27±0.03	5.52±0.01	6.33±0.01	6.88±0.00	12.85±0.01	13.55±0.01	14.57±0.01
C _{16:1}	6.30±0.01	6.09±0.01	5.87±0.01	0.49±0.00	0.40±0.00	0.34±0.01	0.20±0.01	0.17±0.01	0.12±0.00
C _{18:0}	16.15±0.01	16.42±0.01	16.61±0.01	2.87±0.01	5.50±0.01	7.89±0.01	5.01±0.01	6.61±0.01	7.57±0.01
C _{18:1}	38.49±0.02	38.17±0.03	37.92±0.00	55.32±0.01	54.95±0.02	54.23±0.03	25.91±0.00	25.35±0.01	24.80±0.03
C _{18:2}	4.14±0.00	3.87±0.00	3.44±0.01	18.42±0.01	16.91±0.02	16.09±0.01	49.44±0.04	48.53±0.01	47.71±0.01
C _{18:3}	0.52±0.00	0.47±0.00	0.40±0.00	9.17±0.01	7.87±0.01	6.52±0.01	6.59±0.02	5.79±0.01	5.23±0.01
C _{20:1}	ND	ND	ND	4.85±0.01	4.64±0.01	4.14±0.04	ND	ND	ND
C _{22:1}	ND	ND	ND	3.20±0.01	2.94±0.02	2.73±0.01	ND	ND	ND
ΣSFA	50.55±0.01	51.40±0.00	52.37±0.00	8.55±0.01	12.29±0.00	15.95±0.01	17.86±0.02	20.16±0.01	22.14±0.01
ΣUSFA	49.45±0.02	48.60±0.02	47.63±0.03	91.45±0.02	87.71±0.00	84.05±0.02	82.14±0.02	79.84±0.02	77.86±0.04
ΣMUFA	44.79±0.00	44.26±0.04	43.79±0.02	63.86±0.04	62.93±0.00	61.44±0.01	26.11±0.02	25.52±0.01	24.92±0.01
ΣPUFA	4.66±0.01	4.34±0.01	3.84±0.03	27.59±0.01	24.78±0.02	22.61±0.01	56.03±0.00	54.32±0.00	52.94±0.05
脂肪酸	RSG			SBG					
	0 d	15 d	30 d	0 d	15 d	30 d			
C _{14:0}	0.14±0.01	0.30±0.00	1.53±0.00	ND	ND	ND			
C _{16:0}	5.46±0.01	6.24±0.00	7.12±0.02	12.71±0.01	13.11±0.02	13.46±0.03			
C _{16:1}	0.53±0.01	0.44±0.01	0.31±0.00	0.25±0.00	0.18±0.00	0.15±0.00			
C _{18:0}	2.83±0.01	4.16±0.01	4.57±0.01	5.08±0.00	5.47±0.00	5.79±0.01			
C _{18:1}	55.17±0.00	54.94±0.00	54.79±0.01	25.80±0.01	25.62±0.00	25.43±0.01			
C _{18:2}	18.22±0.01	17.77±0.01	17.03±0.01	49.82±0.01	49.59±0.00	49.36±0.00			
C _{18:3}	9.32±0.02	8.41±0.01	7.84±0.01	6.34±0.01	6.03±0.01	5.81±0.01			
C _{20:1}	4.99±0.01	4.74±0.01	4.13±0.01	ND	ND	ND			
C _{22:1}	3.34±0.00	3.00±0.00	2.68±0.01	ND	ND	ND			
ΣSFA	8.43±0.01	10.70±0.00	13.22±0.01	17.79±0.01	18.58±0.01	19.25±0.01			
ΣUSFA	91.57±0.03	89.30±0.00	86.78±0.00	82.21±0.01	81.42±0.02	80.75±0.05			
ΣMUFA	64.03±0.00	63.12±0.01	61.91±0.01	26.05±0.00	25.80±0.01	25.58±0.02			
ΣPUFA	27.54±0.00	26.18±0.01	24.87±0.01	56.16±0.00	55.62±0.02	55.17±0.01			

† ΣSFA 表示饱和脂肪酸的相对含量总和;ΣUSFA 表示不饱和脂肪酸的相对含量总和;ΣMUFA 表示单不饱和脂肪酸的相对含量总和;ΣPUFA 表示多不饱和脂肪酸的相对含量总和。ND:表示没有峰值

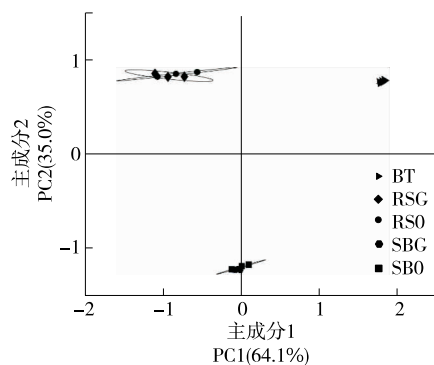


图 3 油脂及其凝胶的 PCA 图

Figure 3 PCA of oils and their gels

长的货架期,这不仅与它们的脂肪酸组成有关,也可能与大豆油中的某些成分(各类磷脂等)溶出与凝胶剂结合,形成更加稳定的三维网络结构有关。

3 结论

通过加速氧化试验,研究了油脂凝胶在贮藏过程中过氧化值和硫代巴比妥酸值的变化。结果表明:油脂凝胶能够抑制初、次级产物的生成,且在短期的贮藏过程中菜籽油凝胶和大豆油凝胶的晶型结构稳定。另外,凝胶结构能够抑制菜籽油凝胶和大豆油凝胶中的 C_{18:2} 和 C_{18:3} 等不饱和脂肪酸的氧化,达到延长货架期的目的。油脂凝胶能够直接改变油脂的物理性状,有效提高油脂的货

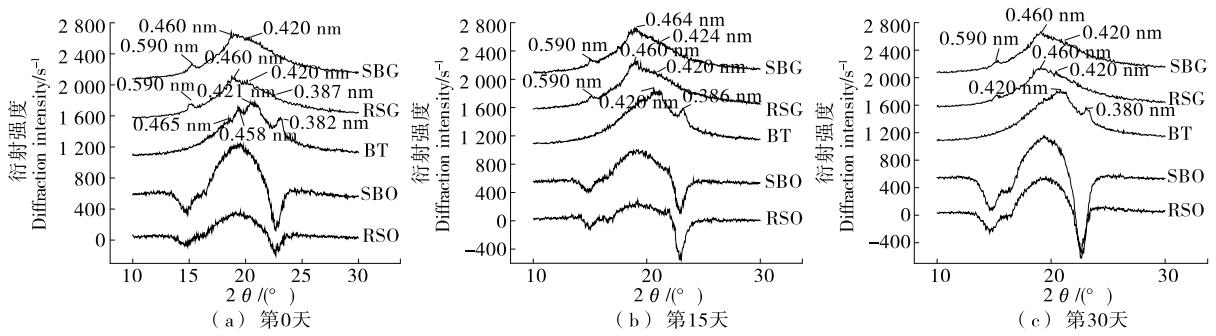


图 4 油脂及其凝胶在贮藏过程中的 XRD 图

Figure 4 XRD patterns of oils and their oleogels during storage

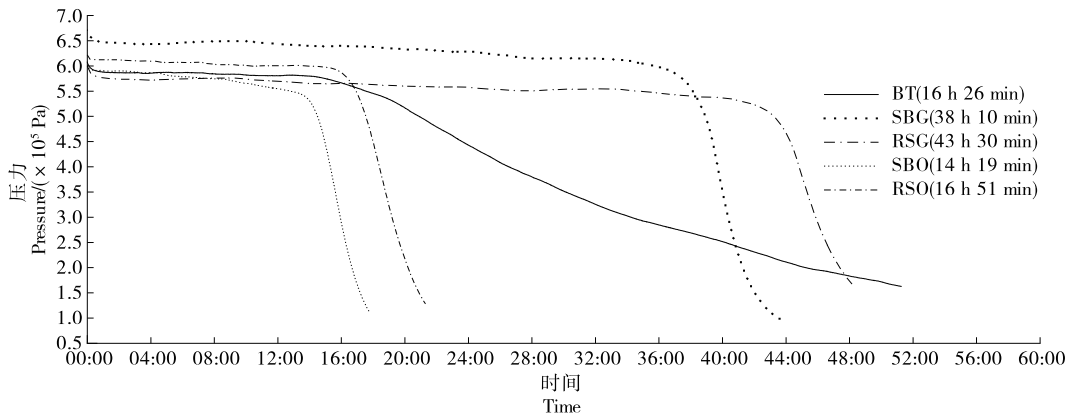


图 5 90 °C 下油脂及凝胶的 IP 值

Figure 5 IP value of oils and their oleogels at 90 °C

表 2 OXITEST 测定货架期结果[†]

Table 2 Results of accelerated shelf-life test conducted with OXITEST

样品	拟合模型	R ²	20 °C 货架期/月	25 °C 货架期/月
SBO	$\ln I_P = -0.0979T + 11.497$	0.9998	19.29	11.83
RSO	$\ln I_P = -0.0939T + 11.307$	0.9998	17.28	10.81
BT	$\ln I_P = -0.1029T + 11.959$	0.9999	27.71	16.56
SBG	$\ln I_P = -0.0856T + 11.382$	0.9990	21.99	14.33
RSG	$\ln I_P = -0.0847T + 11.238$	0.9647	19.39	12.51

[†] 拟合模型中 T 表示温度, °C; I_P 表示氧化诱导期, h.

架期, 相比于菜籽油, 大豆油有更好的氧化稳定性、外观及货架期, 因此, 更适合制备油脂凝胶。油脂凝胶的制备对植物油的进一步开发利用有着重要的意义, 是一种控制油脂氧化的有效策略。

参考文献

[1] 毛锦远, 马晓雨, 胡振瀛, 等. 以樟树籽仁油、油茶籽油、全氢化棕榈油为原料的起酥油基料油的表征[J]. 中国油脂, 2019, 44(11): 23-28.
MAO Jing-yuan, MA Xiao-yu, HU Zhen-ying, et al. Characteristics of shortening base oil from catalytic transesterification of Cinnamomum camphora seed oil, Camellia oleifera oil and fully

hydrogenated palm oil[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(11): 23-28.
[2] 丁泽敏, 刘渝港, 夏会平, 等. 猪油和单甘酯含量对菜籽油凝胶油性质的影响研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(1): 56-60.
DING Ze-min, LIU Yu-gang, XIA Hui-ping, et al. Effect of lard and monoglyceride contents on properties of rapeseed oil oleogel[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(1): 56-60.
[3] 孟宗, 孟祥永, 阴法文, 等. 牛油与低芥酸菜籽油酶法酯交换制备牛油基塑性脂肪的研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(11): 46-50.
MENG Zong, MENG Xiang-yong, YIN Fa-wen, et al. Preparation of beef tallow-based plastic fats by enzymatic interesterification of beef tallow and low erucic acid rapeseed oil[J]. China Oils and Fats, 2013, 38(11): 46-50.

- [4] KROMHOUT D, SPAAIJ C J K, DE GOEDE J, et al. The 2015 Dutch food-based dietary guidelines [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2016, 70(8): 869-878.
- [5] OTENG A B, KERSTEN S. Mechanisms of action of trans fatty acids[J]. *Advances in Nutrition*, 2020, 11(3): 697-708.
- [6] YANAI H. Effects of n-3 polyunsaturated fatty acids on dementia[J]. *J Clin Med Res*, 2017, 9(1): 1-9.
- [7] VIRTANEN J K, MURSU J, VOUTILAINEN S, et al. The associations of serum n-6 polyunsaturated fatty acids with serum C-reactive protein in men: The Kuopio ischaemic heart disease risk factor study[J]. *Eur J Clin Nutr*, 2018, 72: 342-348.
- [8] MAKI K C, PALACIOS O M, BELL M, et al. Use of supplemental long-chain omega-3 fatty acids and risk for cardiac death: An updated meta-analysis and review of research gaps[J]. *J Clin Lipidol*, 2017, 11(5): 1 152-1 160.
- [9] MILLER P E, VAN E N, ALEXANDER D D. Longchain omega-3 fatty acids eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid and blood pressure: A-meta analysis of randomized controlled trials[J]. *Am J Hypertens*, 2014, 27(7): 885-896.
- [10] SHARMA S, CHENG S F, BHATTACHARYA B, et al. Efficacy of free and encapsulated natural antioxidants in oxidative stability of edible oil: Special emphasis on nanoemulsion-based encapsulation[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 305-318.
- [11] 罗晶, 颜梦婷, 李培旭, 等. 12-羟基硬脂酸有机凝胶剂的结构稳定性及热加工对大豆油氧化的影响[J/OL]. *食品科学*. [2021-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206. TS.20201015.1119.014.html>.
LUO Jing, GU Meng-ting, LI Pei-xu, et al. Effect of structure stability and thermal processing of 12-hydroxystearic acid as organogelator on oxidation of soybean oil [J/OL]. *Food Science*. [2021-06-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206. TS.20201015.1119.014.html>.
- [12] HAN L J, LI L, LI B, 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): 1 783-1 792.
- [13] PAN J, TANG L, DONG Q, et al. Effect of oleogelation on physical properties and oxidative stability of camellia oil-based oleogels and oleogel emulsions[J]. *Food Research International*, 2021, 140: 110057.
- [14] 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: 5-7.
HAN Li-juan. Study on the relationship between microstructure evolution and macroscopic properties alteration in supramolecular oleogels[D]. Guangzhou: South China university of technology, 2014: 5-7.
- [15] 王家骅, 刘龙龙, 陈致羽, 等. 菜籽油凝胶的质构特性及形成机理研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(2): 89-94.
WANG Jia-bin, LIU Long-long, CHEN Zhi-yu, et al. Texture properties and formation mechanism of rapeseed oil gels[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(2): 89-94.
- [16] 仇宏图, 李光春, 吴明根, 等. 菜籽油脂质成分分析及甲酯化研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2019, 46(4): 583-588.
QIU Hong-tu, LI Guang-chun, WU Ming-gen, et al. The lipids component analysis and methyl esterification of rapeseed oil[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2019, 46(4): 583-588.
- [17] JUDD A, VILLENEUVE P, ROSSIGNOL-CASTERA A, et al. Antioxidant effect of soy lecithins on vegetable oil stability and their synergism with tocopherols[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2003, 80: 1 209-1 215.
- [18] 袁松, 孙会敏, 丁丽霞. 脂质体物理化学稳定性研究进展[J]. *中国药事*, 2011, 25(4): 384-388.
YUAN Song, SUN Hui-min, DING Li-xia. Progress of physical and chemical stability of liposomes[J]. *Chinese Pharmaceutical Affairs*, 2011, 25(4): 384-388.
- [19] PARASKEVOPOULOU A, BOSKOU D, PARASKEVOPOULOU A. Oxidative stability of olive oil-lemon juice salad dressings stabilized with polysaccharides[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101: 1 197-1 204.
- [20] FRANKEL E, HUANG S. Improving the oxidative stability of polyunsaturated vegetable oils by blending with high-oleic sunflower oil[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1994, 71(3): 255-259.
- [21] KOH S, ARIFIN N, TAN C, et al. Deep frying performance of enzymatically synthesized palm-based medium-and long-chain triacylglycerols (MLCT) oil blends[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(1): 124-135.
- [22] 陈雅琪, 李建成, 舒适, 等. 牛油调和煎炸油的开发及煎炸性能研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(10): 16-21, 34.
CHEN Ya-qi, LI Jian-cheng, SHU Shi, et al. Development and frying performance of butter blend oil for frying[J]. *Chinese Oils and Fats*, 2020, 45(10): 16-21, 34.
- [23] 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.
LI Dan, ZHAO Yue, LI Ting-ting, et al. Effect of oil type on the formation and properties of cinnamic acid-based oleogels[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 9-14.
- [24] 万文博. 荷载姜黄素油脂凝胶的制备及性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 25-26.
WAN Wen-bo. Research on preparation and properties of curcumin-loaded organogel [D]. Guangzhou: South China University, 2016: 25-26.