

# 蜡添加量对巴西棕榈蜡-油茶籽油凝胶物性、氧化稳定性及消化特性的影响

李文辉<sup>1,2</sup>, 权化丽<sup>1,2</sup>, 王玫<sup>1,2</sup>, 付桂明<sup>1,2,3</sup>, 万茵<sup>1,2</sup>

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047; 2. 南昌大学食品学院, 南昌 330031; 3. 南昌大学中德食品工程中心, 南昌 330047)

**摘要:**以油茶籽油为基料油, 巴西棕榈蜡为凝胶剂制备巴西棕榈蜡-油茶籽油凝胶, 探讨不同蜡添加量对其外观形态、持油率、硬度、晶型、热力学性质、氧化稳定性以及消化特性的影响。结果表明: 蜡添加量为5%时才能使油茶籽油凝胶化, 凝胶的硬度、持油率以及结晶/熔融峰值温度总体随着蜡添加量的增加而增大; 凝胶的网络结构能够抑制油茶籽油次级氧化产物生成, 提高油茶籽油的氧化稳定性; 蜡添加量越高的凝胶脂肪酸释放率越低。

**关键词:**油茶籽油凝胶; 巴西棕榈蜡; 物性; 氧化稳定性; 消化特性

中图分类号: TS225.1; TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2021)11-0031-06

## Effect of wax dosage on physical properties, oxidation stability and digestive characteristics of carnauba wax - oil - tea camellia seed oil oleogel

LI Wenhui<sup>1,2</sup>, QUAN Huali<sup>1,2</sup>, WANG Mei<sup>1,2</sup>, FU Guiming<sup>1,2,3</sup>, WAN Yin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 2. College of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Sino-German Food Engineering Center, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** The oil-tea camellia seed oil was used as the raw material oil, the compound oleogel was prepared by adding carnauba wax. The effect of different wax dosages on appearance morphology, oil holding rate, hardness, crystal form, thermodynamic properties, oxidation stability and digestion characteristics of oleogel were analyzed. The results showed that oil-tea camellia seed oil oleogel could be made when 5% carnauba wax was added, and the hardness, oil holding rate, and crystallization/melting peak temperature of the oleogel increased with the increase of wax dosage. The network structure of the oleogel could inhibit the formation of secondary oxidation products of oil and improve the oxidation stability of oil. The fatty acid release rate of the oleogel decreased with the increase of wax dosage.

**Key words:** oil-tea camellia seed oil oleogel; carnauba wax; physical property; oxidation stability; digestion characteristics

塑性脂肪是食品加工领域中重要的原料之一, 被广泛应用于蛋糕、面包、冰淇淋中, 对这些产品的

质构以及风味、口感等优良感官特性的形成具有重要的作用<sup>[1]</sup>。目前, 食品工业中塑性脂肪的来源主要有动物脂肪、热带植物油、氢化植物油等。这些来源中饱和脂肪酸含量很高, 或含有反式脂肪酸, 长期大量摄入可能增加患心血管疾病、肥胖和糖尿病的风险, 危害人体健康<sup>[2-4]</sup>。

植物油凝胶化是通过添加凝胶剂将液态植物油固化的一种方法。相比动物油、氢化油等固体油脂,

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31360391); 江西省重点研发计划项目(20192BBF60037)

作者简介: 李文辉(1995), 男, 在读硕士, 研究方向为食品营养(E-mail)2215406085@qq.com。

通信作者: 万茵, 教授, 博士(E-mail)yinwan@ncu.edu.cn。

植物油凝胶具有低饱和脂肪酸等优点。此外,植物油凝胶可提供与塑性脂肪相似的加工性质<sup>[5]</sup>,还能够作为功能活性因子或药物载体<sup>[6]</sup>,提高产品的营养价值<sup>[7]</sup>。

目前,天然蜡被证明是一种有效的油凝胶剂。大部分的天然蜡都是可食用的,且价格低廉、容易获取<sup>[8]</sup>,其形成的凝胶的物理特性可利用不同的加工方法有针对性地调整,使凝胶获得符合各种食品加工所需的固体脂肪性状<sup>[9]</sup>。

油茶籽油脂肪酸组成与橄榄油非常相似,单不饱和脂肪酸(MUFA)含量高,含有丰富的茶多酚、维生素E、角鲨烯等脂质伴随物。目前,植物油凝胶的研究更多的是使用多不饱和脂肪酸含量高的油脂,如菜籽油、大豆油等,对于油茶籽油等油酸含量高的凝胶研究较少。

本研究使用巴西棕榈蜡和油茶籽油作为原料,采用加热冷却法制备油茶籽油凝胶,并对不同蜡添加量对其外观形态、持油率、硬度、氧化稳定性和消化特性进行系统研究,以期为油茶籽油凝胶的生产应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

精炼油茶籽油,购于江西齐云山股份有限公司;巴西棕榈蜡(食用级),购于网上商城;硫代巴比妥酸、胆盐,上海源叶生物科技有限公司;氯仿、氯化亚铁、硫氰酸铵、三氟乙酸,分析纯,西陇化工股份有限公司。

磁力搅拌水浴锅;TA-XTplus型物性分析仪,英国SMS公司;D8 ADVANCE型X-射线衍射仪,德国Bruker公司;DSC8500差示扫描量热仪,美国PE公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 凝胶样品制备

称取50 g精炼油茶籽油于50 mL烧杯中,加入一定量的巴西棕榈蜡,在90℃下水浴加热搅拌,直到得到澄清的溶液。然后将溶液取出,在室温下冷却,得到凝胶,保存在4℃冰箱中,待用。

#### 1.2.2 外观形态观察

将10 mL不同蜡添加量的巴西棕榈蜡-油茶籽油混合溶液倒入试管中,室温冷却,于4℃冰箱中保存24 h后取出。将样品在5~90℃不同的温度下各放置12 h后,将试管倒置,观察样品的流动性来判断是否凝胶化。基于此,将试管中的混合物分别称为凝胶、固液分层、黏稠液体和液体(非黏性液体)4种状态。

#### 1.2.3 持油率测定

取1~1.5 g凝胶于离心管中,在4℃下以10 000 r/min转速离心15 min。离心结束后,将离心管倒扣在滤纸上,吸收漏出的油。持油率( $y$ )按下式计算。

$$y = \left(1 - \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为离心前离心管与凝胶的总质量; $m_2$ 为离心管的质量; $m_3$ 为离心去除液体油后离心管与凝胶的总质量。

#### 1.2.4 硬度测定

采用物性分析仪测定凝胶的硬度。选用直径10 mm的圆形P5探针,测试前速度2 mm/s,测试中速度1 mm/s,测试后速度2 mm/s,穿刺距离20 mm,触发值0.01 N。

#### 1.2.5 热力学性质分析

使用差示扫描量热仪分析样品的热力学性质。将含有20~30 mg样品的密封盘密封并放置在铝锅中,以5℃/min的速率从5℃升温至90℃,再以相同的速率从90℃降温至5℃。从升温过程中确定熔融峰值温度( $T_m$ );在降温过程中确定结晶峰值温度( $T_c$ )。

#### 1.2.6 晶型分析

采用X-射线衍射仪测定样品的晶型。仪器条件:Cu-K $\alpha$ 放射源(波长 $\lambda = 1.540\ 56\ \text{\AA}$ ),工作电压40 kV,工作电流40 mA,2 $\theta$ 扫描范围10.0°~40.0°,扫描步长为0.02°,扫描速率14 s/step,发射和防反射狭缝1.0 mm,接受狭缝0.1 mm,测试温度25℃。

#### 1.2.7 氧化稳定性分析

将样品分别置于55℃和37℃恒温培养箱中储存18 d,每隔3 d取样测定样品的过氧化值、硫代巴比妥酸反应物含量(TBARS)和茴香胺值( $p-AV$ )。

过氧化值测定采用国际乳业联合会(IDF)标准方法<sup>[10]</sup>,TBARS测定参照GB 5009.181—2016,茴香胺值测定参照GB/T 24304—2009。

#### 1.2.8 体外模拟消化

向样品中添加模拟肠液30 mL(10 mg/mL脂肪酶、20 mg/mL胆盐和3.6 mg/mL氯化钙),在恒定温度为37℃酶反应器中以250 r/min搅拌反应3 h,用0.1 mol/L氢氧化钠维持消化液pH为7.0。

样品在消化过程中释放脂肪酸(FFA)量可以通过NaOH溶液消耗量来确定。脂肪酸释放率( $y$ )按下式计算。

$$y = \frac{V_{\text{NaOH}} \times C_{\text{NaOH}} \times W_{\text{oil}}}{2 \times m_{\text{oil}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $V_{\text{NaOH}}$ 是NaOH溶液消耗的体积; $C_{\text{NaOH}}$ 是NaOH溶液的浓度; $W_{\text{oil}}$ 是油茶籽油的平均相对分子

质量,为887; $m_{oil}$ 是样品中油茶籽油的质量。

### 1.2.9 数据处理

采用 Excel 2016、Origin 9.0 和 Graphpad prism7 对实验数据进行处理与分析,每组实验重复测定3次,结果以“平均值 $\pm$ 标准偏差”形式表示。采用 SPSS24.0 软件进行单因素方差分析, $P < 0.05$  时表示数据间具有显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 外观形态

图1为不同蜡添加量制备的巴西棕榈蜡-油茶籽油混合物在不同温度下的形态相图。深黑色代表凝胶状态,浅黑色代表固液分层的状态,灰色代表黏稠的流体,白色代表可自由流动的液体状态。从图1可以看出,在低温下,蜡添加量达到5% (以油茶籽油质量计) 才能使油茶籽油凝胶化,蜡添加量高时可在70~80℃保持固体形态。相图中出现了灰色部分,这意味着在该温度下蜡添加量过低,无法将油茶籽油全部包裹。随着蜡添加量的增加,凝胶从固体转变为流体的温度也逐渐升高。当温度超过80℃时,凝胶全部转变成液体,不受蜡添加量的影响。由于在3%蜡添加量以下无法形成凝胶,因此实验选择蜡添加量5%、7%、9%和11%制备的凝胶进行后续研究。这4种凝胶在5℃时,呈暗黄色,且蜡添加量越高,颜色越深。

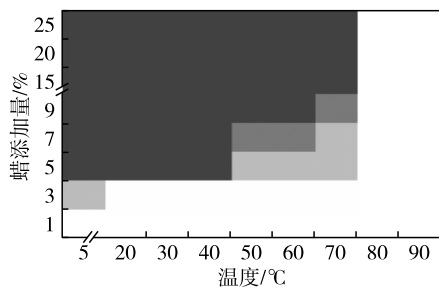
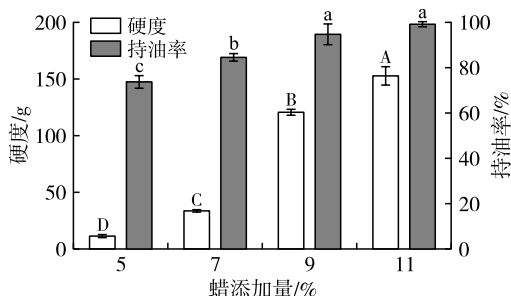


图1 不同蜡添加量制备的巴西棕榈蜡-油茶籽油混合物在不同温度下的形态相图

### 2.2 凝胶的硬度与持油率(见图2)



注:不同大写字母或小写字母代表硬度或持油率有显著差异( $P < 0.05$ )。

图2 不同蜡添加量制备的凝胶的硬度和持油率

凝胶的硬度是凝胶在食品中是否具有潜在应用价值的重要指标。凝胶的硬度可以通过改变凝胶剂的添加量来进行调节,从而满足食品工业中不同脂质产品的硬度要求。由图2可知,随着蜡添加量的增加,凝胶的硬度显著增大。在蜡添加量高时,有更多的蜡参与晶体网络的构建,所以会大大增强凝胶的硬度。

由图2可知,在蜡添加量为5%时,凝胶的持油率仅为74.08%,随着蜡添加量的增加,凝胶的持油率显著增加,在蜡添加量高于9%时,持油率接近100%。凝胶网络结构的持油能力受晶体的形态、分布和表面积等因素的影响。巴西棕榈蜡在油中形成的结晶聚集体呈球状或树突状,尺寸较大,分布不均匀,不利于晶体网络束缚油分子<sup>[11]</sup>,使得蜡添加量低时形成的凝胶的持油率较低。

### 2.3 凝胶的热力学性质(见图3)

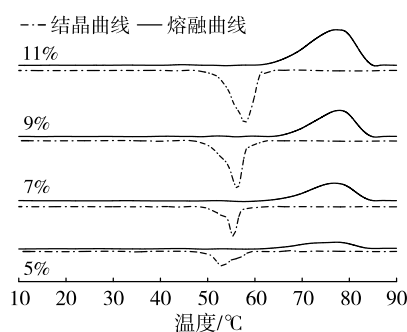


图3 不同蜡添加量制备的凝胶的 DSC 曲线

从图3可以看出,凝胶的结晶峰值温度和熔融峰值温度总体随着蜡添加量的增加而升高,结晶峰和熔融峰都更加清晰尖锐。在蜡添加量为5%、7%、9%和11%时,凝胶结晶峰值温度分别为52.08、55.17、56.01、58.06℃,熔融峰值温度分别为76.99、77.84、77.37、79.24℃。

### 2.4 凝胶的晶型(见图4)

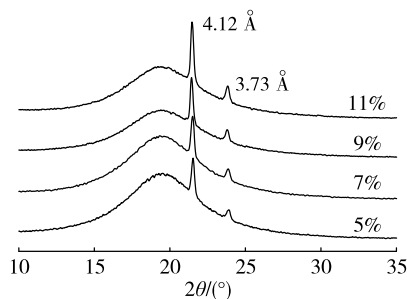


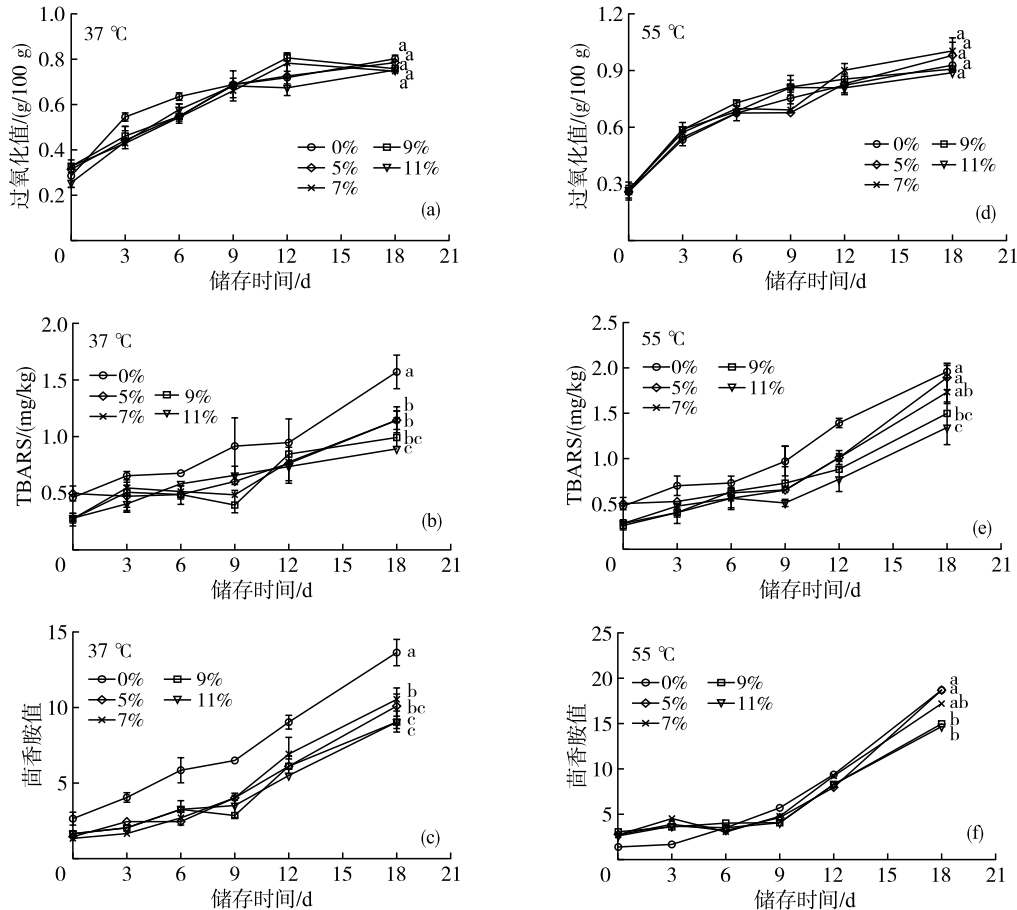
图4 不同蜡添加量制备的凝胶的 XRD 图谱

由图4可以看出,不同蜡添加量制备的凝胶都有两个衍射峰,位置分别在4.12 Å和3.73 Å,差别在于不同样品的衍射峰强度不同,说明凝胶晶型不

受蜡添加量的影响,这与 Blake 等<sup>[12]</sup>的研究结果相近。两个峰出现的位置表明凝胶的晶体堆积方式为垂直正交晶系,与三酰甘油的  $\beta'$  多晶型晶体相似。脂肪晶体的晶型差异会影响脂肪的功能特性。在脂

肪晶体的 3 种晶型中,  $\beta'$  晶型具有更好的功能特性,使富含脂质的产品具有良好的延展性、质地和口感<sup>[13]</sup>。

## 2.5 凝胶的氧化稳定性(见图 5)



注:图中不同字母表示储存 18 d 时有显著差异( $P < 0.05$ )。

图 5 不同蜡添加量制备的凝胶的氧化稳定性

由图 5(a)可以看出,在 37°C 下,凝胶的过氧化值在储存 12 d 后趋于平缓,且在储存 18 d 时样品间的过氧化值无显著差异。高温会加速油脂的氧化,所以相较于 37°C,凝胶在 55°C 下过氧化值增长速率更快,6 d 后较前期增速减小,在储存 18 d 时,样品间的过氧化值无显著差异(见图 5(d))。

脂质氧化是一个复杂的反应过程。当初级产物积累到一定程度时,会发生反应或转化形成次级氧化产物。从图 5(b)、(c)可以看出,在 37°C 储存,对照组(蜡添加量 0%)油茶籽油的 TBARS 值和茴香胺值的增长速率显著高于凝胶。所有凝胶样品在储存 18 d 时的 TBARS 值和茴香胺值都低于油茶籽油的,表现出更好的氧化稳定性。结合过氧化值的结果可以发现,油茶籽油的初级氧化产物更快转化成次级氧化产物,而凝胶由于其内部特殊的晶体网络结构能够有效阻止油茶籽油分子的流动,减缓了初级氧化产物的分解和次级氧化产物的生成,抑制了

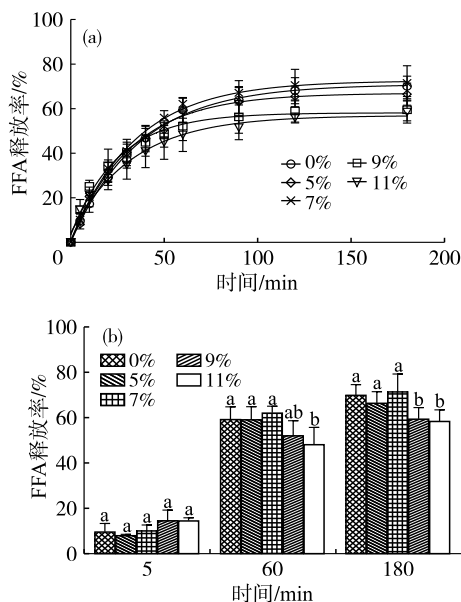
油脂进一步氧化,所以过氧化物在储存初期不断积累<sup>[14]</sup>。蜡添加量为 11% 的凝胶在储存 18 d 时的 TBARS 值和茴香胺值低于蜡添加量为 5% 的凝胶,且 TBARS 值具有显著差异。这可能是由于高浓度的蜡所形成的网络结构更加致密、牢固,能更加有效地限制油分子流动,减少反应物的接触,从而降低次级氧化产物的生成<sup>[15]</sup>。

从图 5(e)、(f)可以看出,在 55°C 储存 18 d 时,低蜡添加量制备的凝胶其 TBARS 值和茴香胺值与油茶籽油相近。这是因为在 55°C 时,低蜡添加量制备的凝胶不能维持其固体状态,持油率降低,析出大量油茶籽油,此时棕榈蜡-油茶籽油混合物失去了晶体网络结构的保护作用,加速了 TBARS 值和茴香胺值的增加。

## 2.6 凝胶的体外模拟消化(见图 6)

从图 6 可以看出,在体外消化初期,脂肪酸释放速度较快,在 60 min 后进入平台期,变化缓慢。比

较样品在5、60、180 min时的游离脂肪酸(FFA)释放率,发现在180 min时,蜡添加量9%和11%制备的凝胶其游离脂肪酸释放率整体显著低于油茶籽油和低蜡添加量制备的凝胶,这可能是因为凝胶强度的差异。从2.2中已知,蜡添加量9%和11%制备的凝胶硬度显著高于低蜡添加量制备的凝胶。在凝胶的消化过程中,机械搅拌、乳化剂以及脂肪酶的共同作用,使凝胶网络结构受到破坏,较大的、块状的凝胶分解成许多体积比较小的凝胶,增加了凝胶的表面积,加速了油脂从凝胶中的释放。强度高的凝胶由于形成的网络更坚固,不易被破坏,牢固晶体网络会影响脂肪酶与油脂的接触,减缓油从凝胶结构内部释放,影响脂肪的水解<sup>[16]</sup>。



注:图(b)中不同小写字母表示相同时间下具有显著差异( $P < 0.05$ )。

图6 凝胶在体外模拟消化过程中游离脂肪酸的释放

### 3 结论

以精炼油茶籽油为基料油,添加不同量的巴西棕榈蜡制备凝胶。分析了凝胶的外观形态、持油率、硬度、晶型及热力学性质,探讨了凝胶的氧化稳定性和体外模拟消化特性。结果表明:蜡添加量越高,凝胶的热稳定性越好;凝胶的硬度、持油率以及结晶峰值温度和熔融峰值温度都随着蜡添加量的增加而增加;凝胶晶型与脂肪晶型相近,具有类似传统塑性脂肪的特性;凝胶结构可以抑制次级氧化产物的产生,提升油茶籽油的氧化稳定性;蜡添加量9%和11%制备的凝胶能够有效降低脂肪消化率,说明使用巴西棕榈蜡制作植物油凝胶是调节油脂消化吸收的一种有效策略。由于巴西棕榈蜡添加量对凝胶的物性、氧化稳定性和消化特性均有显著影响,因此在实

际应用中应该根据不同产品的需求选择合适的巴西棕榈蜡添加量用于制备凝胶。

### 参考文献:

- [1] OSUNA M B, ROMERO A M, AVALLONE C M, et al. Animal fat replacement by vegetable oils in formulations of breads with flour mixes[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2018, 55(3): 858–867.
- [2] PEHLIVANOGLU H, DEMIRCI M, TOKER O S, et al. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: production and food-based applications[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(8): 1330–1341.
- [3] MOZAFFARIAN D, CLARKE R. Quantitative effects on cardiovascular risk factors and coronary heart disease risk of replacing partially hydrogenated vegetable oils with other fats and oils [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2009, 63(2): S22–S33.
- [4] STENDER S, ASTRUP A, DYERBERG J. A *trans* European Union difference in the decline in *trans* fatty acids in popular foods: a market basket investigation [J/OL]. *Bmj Open*, 2012, 2(5): [2021–01–05]. <https://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2012-000859>.
- [5] CUI M, MAO L, LU Y, et al. Effect of monoglyceride content on the solubility and chemical stability of  $\beta$ -carotene in organogels [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2019, 106: 83–91.
- [6] ROGERS M A, STROBER T, BOT A, et al. Edible oleogels in molecular gastronomy [J]. *Int J Gastron Food Sci*, 2014, 2(1): 22–31.
- [7] SINGH A, AUZANNEAU F I, ROGERS M A. Advances in edible oleogel technologies: a decade in review [J]. *Food Res Int*, 2017, 97: 307–317.
- [8] DOAN C D, TAVERNIER I, OKURO P K, et al. Internal and external factors affecting the crystallization, gelation and applicability of wax-based oleogels in food industry [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 45: 42–52.
- [9] SHANTHA N C, DECKER E A. Rapid, sensitive, iron-based spectrophotometric methods for determination of peroxide values of food lipids [J]. *J AOAC Int*, 1994, 77(2): 421–424.
- [10] DOAN C D, TO C M, DE VRIEZE M, et al. Chemical profiling of the major components in natural waxes to elucidate their role in liquid oil structuring [J]. *Food Chem*, 2017, 214: 717–725.
- [11] ÖÇÜTCÜM, ARIFOĞLU N, YILMAZ E. Storage stability of cod liver oil organogels formed with beeswax and carnauba wax [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2015, 50(2): 404–412.

(下转第62页)

## 参考文献:

- [1] ZHAO X, ZHOU Z Q, LIN Q B, et al. Phylogenetic analysis of *Paeonia sect. Moutan* (Paeoniaceae) based on multiple DNA fragments and morphological data[J]. *J Syst Evol*, 2008, 46 (4): 563 – 572.
- [2] YANG P, ZHEN G, XIAO Y H, et al. Chemical and biological comparison of different parts of *Paeonia suffruticosa* (Mudan) based on LC – MS – IT – TOF and multi – evaluation in vitro[J/OL]. *Ind Crop Prod*, 2020, 144: 112028[2021 – 08 – 01]. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112028>.
- [3] LIU P, ZHANG Y, XU Y F, et al. Three new monoterpene glycosides from oil peony seed cake[J]. *Ind Crop Prod*, 2018, 111: 371 – 378.
- [4] LIU P, ZHANG Y, GAO J Y, et al. HPLC – DAD analysis of 15 monoterpene glycosides in oil peonyseed cakes sourced from different cultivation areas in China[J]. *Ind Crop Prod*, 2018, 118: 259 – 270.
- [5] LIU P, ZHANG L N, WANG X S, et al. Characterization of *Paeonia ostii* seed and oil sourced from different cultivation areas in China[J]. *Ind Crop Prod*, 2019, 133: 63 – 71.
- [6] LIU B H, DENG R X, YAN M X, et al. Extraction, isolation and bioactivity of oligostilbenes from oil peony seed shells[J]. *Food Biosci*, 2021, 41: 101 – 104.
- [7] WANG C, XU L, WU Q, et al. The importance of ultrahigh pressure processing over the quality of the extracted oil from peony seeds (*Paeonia suffruticosa* Andr.) [J]. *Ind Crop Prod*, 2015, 76: 1142 – 1147.
- [8] 陈慧玲, 杨彦伶, 张新叶, 等. 油用牡丹研究进展[J]. *湖北林业科技*, 2013, 42(5): 41 – 44.
- [9] LI S S, YUAN R Y, CHEN L G, et al. Systematic qualitative and quantitative assessment of fatty acids in the seeds of 60 tree peony (*Paeonia section Moutan* DC.) cultivars by GC – MS[J]. *Food Chem*, 2015, 173: 133 – 140.
- [10] CAO G, LIN H, CHENG Y, et al. Factors affecting fruit and seed production of *Paeonia ostii* “Feng Dan”, an economically important oil tree [J]. *Plant Spec Biol*, 2021, 36: 258 – 268.
- [11] JIN F, XU J, LIU X R, et al. Roasted tree peony (*Paeonia ostii*) seed oil: benzoic acid levels and physicochemical characteristics[J]. *Int J Food Prop*, 2019, 22(1): 499 – 510.
- [12] 吴悠, 李梅青, 孙强, 等. 超声辅助提取凤丹籽总黄酮的工艺研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2012, 24 (10): 1454 – 1457.
- [13] 刘普, 卢宗元, 邓瑞雪, 等. 凤丹籽饼粕化学成分研究[J]. *中草药*, 2013, 44 (22): 3105 – 3108.
- [14] NADIN A, YING G, CHUNNIAN H, et al. In vitro antitumor effects of two novel oligostilbenes, *cis* – and *trans* – suffruticosol D, isolated from *Paeonia suffruticosa* seeds [J]. *Int J Oncol*, 2016, 48(2): 646 – 656.
- [15] 王兴瑞, 陈昀昀, 韩玉泽, 等. 青海亚麻籽总酚含量测定及其抗氧化活性研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(8): 121 – 137.
- [16] 蔡如玉, 常世敏, 宋春丽. “凤丹”油用牡丹籽多酚提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(7): 181 – 186.
- [17] 张兆远, 阮洪生. 金荞麦根茎乙醇提取物抗氧化和对  $\alpha$  – 葡萄糖苷酶、 $\alpha$  – 淀粉酶的抑制作用[J]. *中药药理与临床*, 2017, 33(2): 102 – 106.
- [18] 张丙云, 苏丹, 郭涛, 等. 竹叶椒乙醇提取物对  $\alpha$  – 葡萄糖苷酶的抑制作用及其机理研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(21): 345 – 348.
- (上接第 35 页)
- [12] BLAKE A I, TORO – VAZQUEZ J F, HWANG H – S. Wax oleogels[M]// MARANGONI A, GARTJ N. *Edible Oleogels*. New York: Academic Press and AOCS Press, 2018: 133 – 171.
- [13] ÖĞÜTCÜ M, ARIFOĞLU N, YILMAZ E. Preparation and characterization of virgin olive oil – beeswax oleogel emulsion products[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2015, 92 (4): 459 – 471.
- [14] LIU L, RAMIREZ I S A, YANG J, et al. Evaluation of oil – gelling properties and crystallization behavior of sorghum wax in fish oil[J/OL]. *Food Chem*, 2019, 309: 125567[2021 – 01 – 05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125567>.
- [15] MARTINS A J, CERQUEIRA M A, CUNHA R L, et al. Fortified beeswax oleogels: effect of *beta* – carotene on the gel structure and oxidative stability [J]. *Food Funct*, 2017, 8(11): 4241 – 4250.
- [16] CM O S, DAVIDOVICH – PINHAS M, WRIGHT A J, et al. Ethylcellulose oleogels for lipophilic bioactive delivery – effect of oleogelation on in vitro bioaccessibility and stability of *beta* – carotene [J]. *Food Funct*, 2017, 8 (4): 1438 – 1451.