

米糠蜡添加量对亚麻籽油基油凝胶 结构及性质的影响

王菊花¹, 许佳敏¹, 佟祎鑫¹, 彭淑婷¹, 白万明², 白小勇², 孔维宝^{1,3}

(1. 西北师范大学 生命科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃陇南田园油橄榄科技开发有限公司, 甘肃陇南 746099; 3. 甘肃特色植物有效成分制品工程技术研究中心, 兰州 730070)

摘要:为探究亚麻籽油基油凝胶作为替代传统塑性脂肪的潜力,以米糠蜡为凝胶剂,探究不同米糠蜡添加量对亚麻籽油基油凝胶外观形态、微观结构、持油率、理化性质及热力学性质的影响。结果表明:在室温条件下,米糠蜡添加量不小于6%时才会使亚麻籽油凝胶化;随着米糠蜡添加量的增加,油凝胶的结晶网络结构由簇状逐渐转变为针状,结晶密度增大;油凝胶的持油率、酸值以及熔融峰/结晶峰峰值温度均随着米糠蜡添加量的增加而增大;油凝胶的过氧化值随着米糠蜡添加量的增加呈现先增后减的趋势。综上,在亚麻籽油中添加适量的米糠蜡可形成热塑性好、结构稳定、理化性质良好、持油率高的油凝胶。

关键词:油凝胶; 亚麻籽油; 米糠蜡; 结构; 性质; 持油性

中图分类号: TS225.1; TQ645.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)07-0017-06

Effect of rice bran wax addition on structure and properties of linseed oil – based oleogel

WANG Juhua¹, XU Jiamin¹, TONG Yixin¹, PENG Shuting¹, BAI Wanming², BAI Xiaoyong², KONG Weibao^{1,3}

(1. College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Longnan Tianyuan Olive Technology Development Co., Ltd., Longnan 746099, Gansu, China; 3. Bioactive Products Engineering Research Center for Gansu Distinctive Plants, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to explore the potential of linseed oil – based oleogel as a substitute for traditional plastic fat, using rice bran wax as the gelling agent, the effects of different rice bran wax addition on the appearance, microstructure, oil holding rate, physicochemical properties and thermodynamic properties of linseed oil – based oleogel were investigated. The results showed that at room temperature, linseed oil would be gelled when the addition of rice bran wax was not less than 6%. With the increase of rice bran wax addition, the crystal network structure of oleogel gradually changed from cluster to needle, and the crystal density increased. The oil holding rate, acid value and peak temperature of melting peak/

crystallization peak of oleogel increased with the increase of rice bran wax addition. The peroxide value of oleogel increased first and then decreased with the increase of rice bran wax addition. In conclusion, adding appropriate amount of rice bran wax to linseed oil can form an oleogel with good thermoplasticity, stable structure, good physicochemical properties and high oil holding rate.

Key words: oleogel; linseed oil; rice bran wax; structure; property; oil holding capacity

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2023-04-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1002402-03); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-37); 科技助力经济2020重点专项项目; 2020中央引导地方科技发展专项项目资助; 西北师范大学重大科研项目培育计划资助(NWNU-LKZD2022-02)

作者简介: 王菊花(1998), 女, 硕士研究生, 主要从事功能油脂研究工作(E-mail) 3276043619@qq.com。

通信作者: 白万明, 工程师(E-mail) 1005179156@qq.com; 孔维宝, 教授, 硕士生导师(E-mail) kwbao@163.com。

在日常生活中,人们所食用的奶油、起酥油、涂抹脂、冰淇淋等食品原料主要为塑性脂肪,因其可以使加工食品具有独特的结构、风味等,在食品加工中被广泛使用^[1]。传统塑性脂肪中含有较高的饱和脂肪酸和反式脂肪酸,长期食用会导致人体肥胖,以及患心血管疾病、糖尿病风险增高^[2]。研究发现,油凝胶(Oleogel)可作为一种新型凝胶化塑性脂肪以替代传统塑性脂肪^[3-5]。油凝胶是将液态植物油固态化,即在一定温度条件下,将某种凝胶剂溶解在液态植物油中,经降温处理,食用植物油被包裹于凝胶剂形成的网络结构中,限制其流动,形成凝胶化脂质产品^[6]。相较于传统塑性脂肪,油凝胶不仅饱和脂肪酸含量低、可塑性高,而且可以作为某种载体以输送和控释功能活性因子^[7]。油凝胶的使用在满足食品加工生产需求的同时降低危害人体健康的风险,近年来受到食品加工领域业内研究者的广泛关注^[6,8-9]。

油凝胶制备所用凝胶剂多选择食品级植物蜡,主要源于其形成的网络结构稳定、易结晶,且来源广、价格低、易获取^[9-10]。目前选择较多的植物蜡主要有蜂蜡^[11]、米糠蜡^[12]、巴西棕榈蜡^[13]、甘蔗蜡^[14]、树蜡^[15]。米糠蜡是米糠油生产过程中的一种副产物,属于天然植物蜡,精制米糠蜡呈白色或淡黄色固体,熔点78~81℃,室温下易结晶,能均匀分散于液态油,米糠蜡还含有高分子质量的脂肪醇,如二十八烷醇,具有降低人体胆固醇的功能^[16]。

亚麻(*Linum usitatissimum* L.)是一种广泛分布于我国西北地区的油料作物,其籽实油脂含量高^[17-18]。亚麻籽油含有多种不饱和脂肪酸(α -亚麻酸约占50%)^[18]、维生素E等功能活性物质,具有抗衰老、抗氧化^[19]、调节血脂血糖、防止肥胖和糖尿病^[20-21]、抗炎^[22]、增强免疫功能^[23-24]、保护神经^[21,25]、抗心血管疾病^[26]等功效。目前,关于亚麻籽油基油凝胶的研究相对较少^[27],大多集中在其他食用油,如山茶油、葵花籽油、玉米油等。

本研究以米糠蜡为凝胶剂,采用加热-冷却法制备亚麻籽油基油凝胶,研究其外观形态、微观结构、持油性、理化性质(酸值、过氧化值)、热力学性质等指标,以期为亚麻籽油基油凝胶产品的开发应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

亚麻籽油,甘肃骏兴农业科技发展有限公司;米糠蜡,购于网上商城。氢氧化钾、乙醇、异辛烷、冰乙酸、碘化钾、酚酞、五水合硫代硫酸钠。

1.1.2 仪器与设备

TG-DTA型热重/差热分析仪,珀金埃尔默企业管理上海有限公司;HCJ-6D型恒温磁力搅拌水浴锅,金坛市国旺实验仪器厂;PTY-A220型电子天平,华志电子科技有限公司;H1850R型台式高速冷冻离心机,湖南湘仪离心机仪器有限公司;S10-3型恒温磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;DM5000型偏光显微镜,莱卡新材料佛山有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 亚麻籽油基油凝胶的制备

称取10g亚麻籽油于50mL烧杯中,放置在恒温磁力搅拌器上加热至80℃,按照质量分数为3%、6%、9%、12%、15%分别加入米糠蜡,搅拌20min至完全溶解,于室温下冷却凝固后置于4℃冰箱24h得油凝胶。

1.2.2 油凝胶的外观形态观察

取5g亚麻籽油凝胶样品,在5、10、20、30、40、50、60、70、80℃条件下各放置12h,观察倾斜离心管时油凝胶的流动性。

1.2.3 油凝胶的结晶微观结构观察

用偏光显微镜(PLM)在放大倍数为40倍下观察油凝胶装片的结晶微观结构并记录。

1.2.4 油凝胶的持油率测定

称取一定量油凝胶样品于10mL空离心管(质量记为 a)中,称其质量(b),在20℃、8000r/min下离心15min,取出,在滤纸上倒置15min后再次称其质量(c)。油凝胶的持油率(Y)按公式(1)计算。

$$Y = [1 - (b - c) / (b - a)] \times 100\% \quad (1)$$

1.2.5 油凝胶的理化性质测定

酸值的测定参照GB 5009.229—2016,过氧化值的测定参照GB 5009.227—2016。

1.2.6 油凝胶的热力学性质分析

称取10mg油凝胶样品于热重/差热分析仪专用铝盒中,在初始温度25℃下以5℃/min的速率将其加热至90℃,保持10min以消除结晶记忆,再以自然降温速率降至20℃,保持20min充分结晶,再以5℃/min的速率升温至90℃,期间氮气流速为20mL/min,记录结晶及熔化过程中的热变化曲线。

1.2.7 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2010处理数据,采用SPSS 25.0统计软件进行单因素方差分析(ANOVA)和沃勒-邓肯检验($p < 0.05$),采用Origin 9.5软件绘图。

2 结果与分析

2.1 米糠蜡添加量对油凝胶外观形态的影响

观察1.2.1中于室温下冷却放置12h的不同米糠蜡添加量下样品的外观形态。

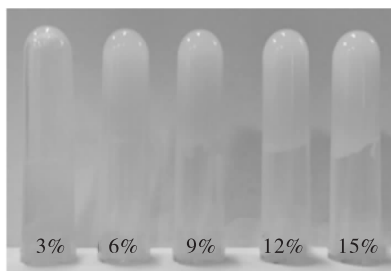


图1 米糠蜡添加量对油凝胶外观形态的影响

由图1可知:当亚麻籽油中添加3%米糠蜡时,在室温条件下呈黏稠状态,未形成油凝胶;而添加6%、9%、12%、15%米糠蜡时,在室温条件下形成了油凝胶,呈现凝胶态。研究发现,随着米糠蜡添加量逐渐增加,油凝胶结晶时间越短,形成速度越快。米糠蜡添加量为3%的亚麻籽油未呈现凝胶态的原因为米糠蜡含量较少,其冷却过程中形成的结晶网络结构较稀疏,未能将液态亚麻籽油紧锁于晶体结构中,导致亚麻籽油呈黏稠状。而随着米糠蜡添加量的不断增加,形成的结晶网络结构逐渐致密,将液态亚麻籽油更好地包裹其中,使液态油流动性降低,呈现凝胶态。

按1.2.2方法在不同温度梯度下,观察米糠蜡添加量对油凝胶样品流动性的影响,结果见图2。

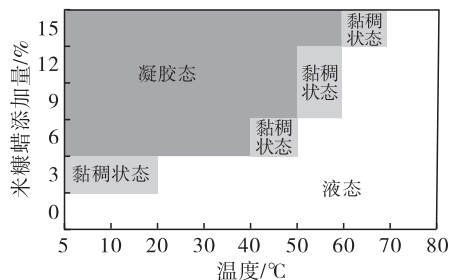


图2 米糠蜡添加量对油凝胶流动性的影响

根据倾斜离心管时亚麻籽油凝胶样品的流动性将其分为液态、黏稠状态、凝胶态。由图2可知,亚麻籽油基油凝胶的形成与米糠蜡添加量和温度均有一定关系。当米糠蜡添加量小于3%时,在设定任意温度下均未观察到油凝胶样品形成凝胶态。当米糠蜡添加量大于3%,温度低于40°C时,油凝胶样品均处于凝胶态。当米糠蜡添加量大于等于9%时,在50°C以下油凝胶样品处于凝胶态,当温度高于50°C时,油凝胶体系会逐渐转变为黏稠状态或液态。由此表明,当温度处于室温,米糠蜡添加量不小于6%时,即可制备亚麻籽油基油凝胶,其中6%的米糠蜡添加量为制备亚麻籽油基油凝胶的临界值。

2.2 米糠蜡添加量对油凝胶结晶微观结构的影响

图3为不同米糠蜡添加量下油凝胶的PLM图。

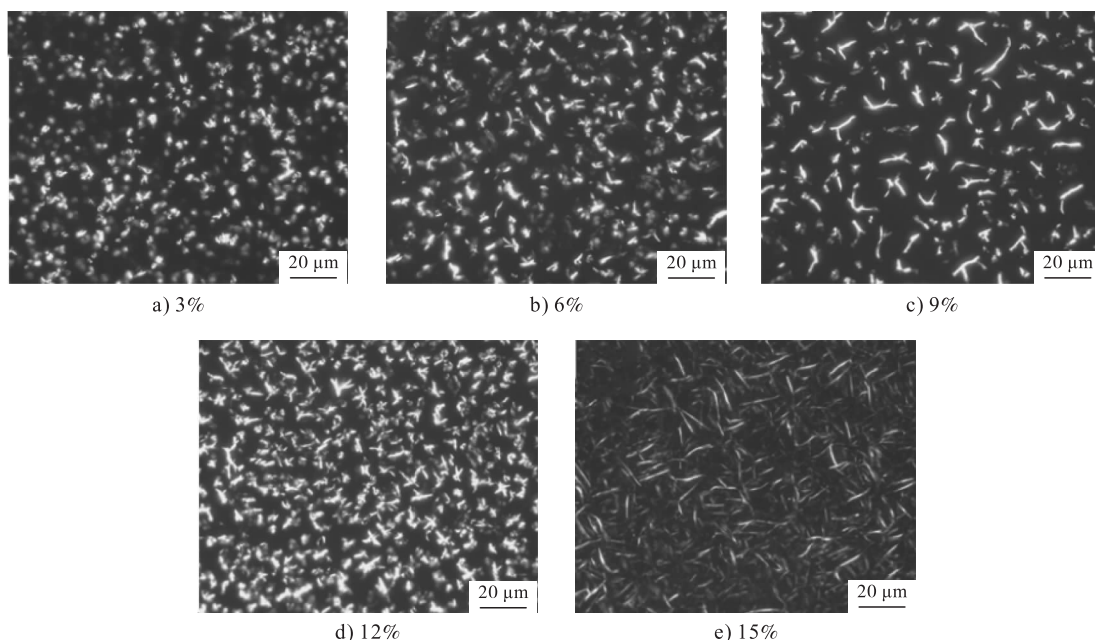


图3 米糠蜡添加量对油凝胶结晶微观结构的影响(40×)

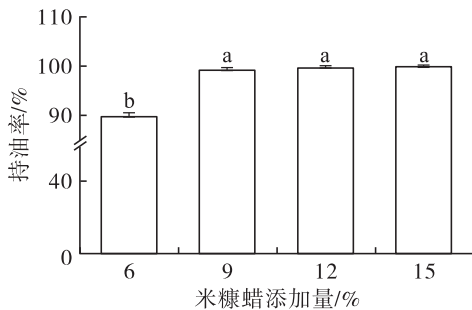
由图3可知,不同添加量的米糠蜡在亚麻籽油中形成了不同程度的晶体网络结构。米糠蜡添加量为3%时,体系中晶体呈簇状、分支较粗,晶体密度较小,未构成致密的晶体网络结构;米糠蜡添加量为6%时,油凝胶晶体呈簇状、分支增多,部分分支呈针

状排列,晶体密度随之增大;米糠蜡添加量为9%时,油凝胶晶体呈簇状,分支基本呈针状排列,晶体密度比6%米糠蜡添加量的油凝胶晶体大;米糠蜡添加量为12%时,油凝胶晶体呈簇状,分支增多且呈针状排列,晶体密度比9%米糠蜡添加量的油

凝胶晶体大;米糠蜡添加量为 15% 时,油凝胶晶体呈针状排列,晶体密度最大,形成致密的晶体网络结构。Morales - Rueda^[28]、周航^[29]等研究发现,米糠蜡制备油凝胶形成的长针状晶体可以很好地嵌合成致密的网络结构而将大量的液体油截留。综上所述,随着米糠蜡添加量的不断增加,油凝胶的晶体密度随之增加,且晶体形态由簇状逐渐转变为针状,晶体分布更加均匀,进一步形成致密的网络结构。

2.3 米糠蜡添加量对油凝胶持油率的影响

持油性是制备油凝胶产品的重要性能之一,反映了凝胶剂在加热-冷却过程中形成的网络结构所包裹液体油的能力^[30-31]。图 4 为不同米糠蜡添加量下油凝胶的持油率。



注:不同的小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

图 4 米糠蜡添加量对油凝胶持油率的影响

由图 4 可知,油凝胶的持油率随米糠蜡添加量的增加先显著增大($p < 0.05$)后趋于稳定。当米糠蜡添加量为 6% 时,油凝胶的持油率达到 89%。当米糠蜡添加量达到 9% 及以上时,油凝胶的持油率高于 99%,并且油凝胶的外观形态也呈现凝胶态(见图 1),说明形成的致密晶体网络结构能够束缚住大量的液体油。

2.4 米糠蜡添加量对油凝胶理化性质的影响

油脂加工产品的酸值和过氧化值是评判其质量的重要指标,本研究测定了不同米糠蜡添加量下油凝胶的酸值、过氧化值,结果分别如图 5 和图 6 所示。

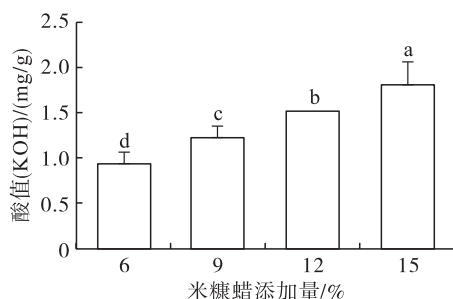


图 5 米糠蜡添加量对油凝胶酸值的影响

酸值主要反映油脂中游离脂肪酸的含量,可衡量油脂的变质程度。由图 5 可知,油凝胶的酸值随米糠蜡添加量的增加显著增大($p < 0.05$)。当米糠蜡添加量为 15% 时,油凝胶酸值(KOH)达到 1.80 mg/g。周航^[29]研究不同天然蜡油凝胶的特性时发现,天然蜡自身的酸值、过氧化值均较低,用其制备油凝胶不会对油凝胶的酸值、过氧化值产生较大影响,本实验结果与其不一致,原因有待进一步分析。

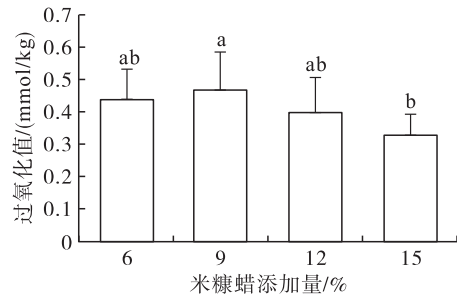


图 6 米糠蜡添加量对油凝胶过氧化值的影响

过氧化值反映油脂的氧化程度。由图 6 可看出,油凝胶的过氧化值随米糠蜡添加量的增加总体呈现先升高后下降的趋势。当米糠蜡添加量为 9% 时,油凝胶的过氧化值(0.47 mmol/kg)最高,米糠蜡添加量为 15% 时,油凝胶的过氧化值(0.33 mmol/kg)最低。当米糠蜡添加量大于 9% 时,油凝胶过氧化值随米糠蜡添加量的增加而降低的原因可能是油凝胶的晶体网络结构随米糠蜡含量的增加而更加致密,更有效地限制亚麻籽油的流动,从而减少其与空气等反应物的接触,抑制次级氧化产物的产生,从而提高了油凝胶的氧化稳定性^[32]。

2.5 米糠蜡添加量对油凝胶热力学性质的影响

采用差示扫描量热法(DSC)分析油凝胶样品的相变熔融温度和结晶温度,分析米糠蜡添加量对油凝胶热力学性质的影响,结果如图 7 所示。

由图 7a 可知,在升温过程中,米糠蜡添加量为 6%、9%、12%、15% 的油凝胶熔融峰峰值温度分别为 72.9、73.8、74.6、75.9 °C。油凝胶熔融峰峰值温度随米糠蜡添加量的增加呈现上升趋势。但是与米糠蜡熔点(78~81 °C)相比,油凝胶样品的熔融温度较低。由图 7b 可知,在降温过程中,米糠蜡添加量为 6%、9%、12%、15% 的油凝胶结晶峰峰值温度分别为 57.3、61.7、64.5、65.6 °C。油凝胶的结晶峰峰值温度随着米糠蜡添加量的增加而不断升高。Doan^[30]、曹睿智^[33]等研究发现随着米糠蜡添加量的增加,油凝胶的熔融峰峰值温度和结晶峰峰值温度呈上升趋势,与本研究结果一致。

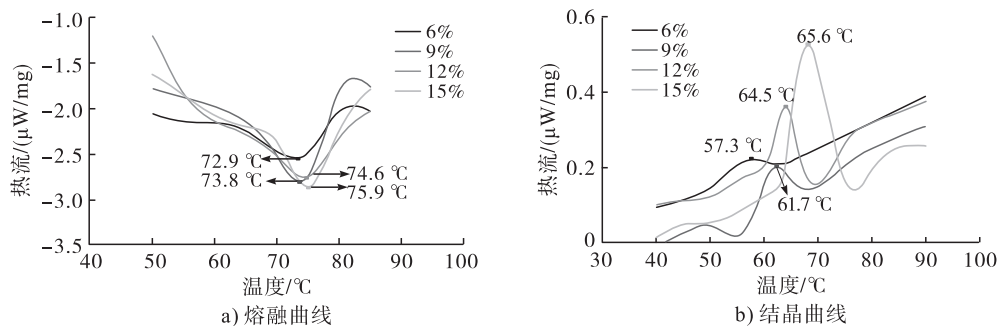


图7 米糠蜡添加量对油凝胶热力学性质的影响

本研究中油凝胶的熔融峰峰值温度高于结晶峰峰值温度。熔融峰峰值温度和结晶峰峰值温度的差值代表过冷度(ΔT), ΔT 值越小结晶速率越快, 油凝胶的结晶度越好。图8为不同米糠蜡添加量下油凝胶的过冷度。

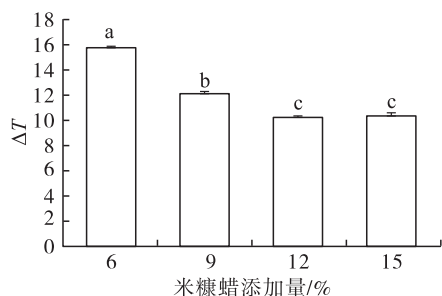


图8 米糠蜡添加量对油凝胶过冷度的影响

由图8可知, 油凝胶的 ΔT 值随米糠蜡添加量的增加而显著降低 ($p < 0.05$), 米糠蜡添加量为6%的油凝胶 ΔT 值最大 (15.6 °C), 米糠蜡添加量为12%的油凝胶 ΔT 值最小 (10.1 °C)。上述结果说明油凝胶中米糠蜡含量的增加会使油凝胶结晶速率加快, 同时油凝胶的结晶度也随之增加, 结晶性能更好。

3 结论

以亚麻籽油为基料油, 添加不同质量分数的米糠蜡制备油凝胶, 观察油凝胶的外观形态、微观结构, 探讨油凝胶的持油率、酸值、过氧化值以及热力学性质。结果表明, 当米糠蜡添加量大于3%时, 亚麻籽油才会呈现凝胶态, 并且在室温条件下, 米糠蜡添加量为6%是形成油凝胶的临界值。米糠蜡添加量越高, 油凝胶的持油率越好。随着米糠蜡添加量的增加, 油凝胶的晶体密度增大, 晶体形态由簇状逐渐转变为针状, 晶体分布更加均匀, 形成致密的网络结构。油凝胶的酸值随着米糠蜡添加量的增加而增大, 过氧化值随着米糠蜡添加量的增加呈现先升高后下降趋势。油凝胶的熔融峰峰值温度和结晶峰峰值温度均较高, 说明油凝胶的结晶度较高, 热力学性质更稳定。因此, 在亚麻籽油中添加适量米糠蜡可

以制备出热塑性好、结构稳定、理化性质良好、持油率高的油凝胶。本研究为亚麻籽油基油凝胶产品的开发应用提供了一定的理论依据。

参考文献:

- [1] 张超然, 李杨, 孙晓洋, 等. 酶法酯交换制备塑性脂肪工艺优化及氧化稳定性研究[J]. 大豆科技, 2019 (S1): 349-354.
- [2] STORTZ T A, ZETZL A K, BARBUT S, et al. Edible oleogels in food products to help maximize health benefits and improve nutritional profiles[J]. Lipid Tech, 2012, 24 (7): 151-154.
- [3] MARTINS A J, VICENTE A A, CUNHA R L, et al. Edible oleogels: an opportunity for fat replacement in foods[J]. Food Funct, 2018, 9(2): 758-773.
- [4] PATEL A A, DEWETTINCK K. Edible oil structuring: an overview and recent updates[J]. Food Funct, 2016, 7 (1): 9-20.
- [5] WANG F C, GRAVELLE A J, BLAKE A I, et al. Novel *trans* fat replacement strategies[J]. Curr Opin Food Sci, 2016, 7:27-34.
- [6] 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.
- [7] 夏天航, 魏子淇, 马磊, 等. 负载虾青素的油凝胶纳米乳液的构建及体外消化研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 1-7.
- [8] PUSCAS A, MURESAN V, SOCACIU C, et al. Oleogels in food: a review of current and potential applications[J/OL]. Foods, 2020, 9(1): 70[2022-03-23]. <https://doi.org/10.3390/foods9010070>.
- [9] BLAKE A I, CO E D, MARANGONI A G, et al. Structure and physical properties of plant wax crystal networks and their relationship to oil binding capacity[J]. J Am Oil Chem Soc, 2014, 91(6): 885-903.
- [10] LIU C H, ZHENG Z J, MENG Z, et al. Beeswax and carnauba wax modulate the crystallization behavior of palm kernel stearin[J/OL]. Food Sci Tech, 2019, 115: 108446[2022-03-23]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108446>.
- [11] 王一川, 邓梓萌, 毛立科. 基于蜂蜡油凝胶的植物奶

- 油制备与性质表征[J]. 食品科学, 2022, 43(10): 43-50.
- [12] 胡培泓, 杨国龙, 徐倩. 司盘 65-米糠蜡油凝胶的结晶行为及微观形态的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 25-32.
- [13] BARROSON G, OKURO P K, RIBEIRO A P B, et al. Tailoring properties of mixed-component oleogels: wax and monoglyceride interactions towards flaxseed oil structuring[J/OL]. Gels, 2020, 6(1): 5 [2022-03-23]. <https://doi.org/10.3390/gels6010005>.
- [14] 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.
- [15] 汪鸿, 孙立斌, 张亮, 等. 小烛树蜡油脂凝胶的性质及作用机理研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 91-95.
- [16] 黄兆华. 米糠蜡构筑液态油脂晶体网络的研究及其在油基食品和多重乳液中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [17] 李国斌. 利用细胞壁降解酶混合物增强亚麻籽油的提取[J]. 食品工业, 2022, 43(1): 135-138.
- [18] 亢敏, 党玲. 精炼工艺对亚麻籽油品质及其氧化稳定性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6): 74-77, 86.
- [19] 耿娜, 梁哲, 李茉, 等. 不同食用油对番茄红素抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 49-53.
- [20] 张晓霞, 穆静, 杨正飞. 富含 α -亚麻酸的亚麻籽油通过调节肠道菌群和抑制炎症改善大鼠 2 型糖尿病[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2021, 35(10): 805.
- [21] REZA T O, ALIREZA M, ZELJKO R, et al. Effects of flaxseed oil supplementation on biomarkers of inflammation and oxidative stress in patients with metabolic syndrome and related disorders: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Clin Nutr Espen, 2020, 40: 27-33.
- [22] ALMOUSA A A, MEURENS F, KROL E S, et al. Linoorbites and enterolactone mitigate inflammation-induced oxidative stress and loss of intestinal epithelial barrier integrity[J]. Int Immunopharmacol, 2018, 64: 42-51.
- [23] 黄莉, 闫实, 孙晓璐, 等. 亚麻籽油对小鼠免疫功能的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(12): 56-59, 99.
- [24] IIKE K, YASEMIN B K, SERDA K G, et al. Linseed oil nanoemulsions for treatment of Atopic Dermatitis disease: formulation, characterization, in vitro and in silico evaluations[J/OL]. J Drug Deliv Sci Tech, 2021, 64: 102652 [2022-03-23]. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102652>.
- [25] 王晓菡, 任小娜, 曾俊. 亚麻籽油的提取工艺及其生理功能的研究进展[J]. 粮油加工, 2014(6): 43-46.
- [26] 李一唯, 汪婷, 鲍婷, 等. 亚麻籽油对动脉粥样硬化 ApoE^(-/-)小鼠 M-MDSC 及炎症因子的影响[J]. 免疫学杂志, 2021, 37(9): 737-745.
- [27] HECK R T, SALDANA E, LORENZO J M, et al. Hydrogelled emulsion from chia and linseed oils: a promising strategy to produce low-fat burgers with a healthier lipid profile[J]. Meat Sci, 2019, 156: 174-182.
- [28] MORALES-RUEDA J A, DIBILDOX-ALVARADO E, CHARO-ALONSO M A, et al. Thermo-mechanical properties of candelilla wax and dotriacontane organogels in safflower oil[J]. Eur J Lipid Sci Tech, 2009, 111(2): 207-215.
- [29] 周航. 米糠蜡凝胶油的结晶特性及应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- [30] DOAN C D, WALLE D V D, DEWETTINCK K, et al. Evaluating the oil-gelling properties of natural waxes in rice bran oil: rheological, thermal, and microstructural study[J]. J Am Oil Chem Soc, 2015, 92(6): 801-811.
- [31] KANAGARATNAM S, HOQUE M E, SAHRI M M, et al. Investigating the effect of deforming temperature on the oil-binding capacity of palm oil based shortening[J]. J Food Eng, 2013, 118(1): 90-99.
- [32] MARTINS A J, CERQUEIRA M A, CUNHA R L, et al. Fortified beeswax oleogels: effect of β -carotene on the gel structure and oxidative stability[J]. Food Funct, 2017, 8(11): 4241-4250.
- [33] 曹睿智, 朱光辉, 宋洁, 等. 米糠蜡对大豆油凝胶特性的影响研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 28-32.