



张瑜,薛雨舒,沈乙杰,等.超声处理对蜂蜡-单甘酯基核桃油凝胶结构与性质的影响[J].轻工学报,2024,39(1):12-21.
ZHANG Y,XUE Y S,SHEN Y J,et al. Effect of ultrasound treatment on the structure and properties of walnut oil oleogels based on the beeswax-monoacylglycerol[J]. Journal of Light Industry,2024,39(1):12-21.
DOI:10.12187/2024.01.002

超声处理对蜂蜡-单甘酯基核桃油凝胶结构与性质的影响

张瑜^{1,2},薛雨舒^{1,2},沈乙杰^{1,2},宋凯若^{1,2},王丰俊^{1,2}

1. 林业食品加工与安全北京市重点实验室,北京 100083;
2. 北京林业大学 生物科学与技术学院,北京 100083

摘要:以蜂蜡-单甘酯复合凝胶剂制备的核桃油凝胶为研究对象,探究在复合凝胶剂融化前后进行超声处理对核桃油凝胶结构与性质的影响。结果表明:蜂蜡与单甘酯质量比为 3:7 时,所制备核桃油凝胶的特油率(OBC)在 95%以上,具有光滑稳定的表现形态;在一定剪切应变范围内,所有核桃油凝胶均呈现出类固体的弹性性质,且经 100 W-30 s 超声处理所制备的核桃油凝胶具有较强的机械性能;超声处理可改善核桃油凝胶的晶体结构,产生更致密、细小的晶体形态,有效提高核桃油凝胶的 OBC 和热稳定性;搅打核桃油凝胶可获得裱花性能优异的油泡沫,且超声处理可显著提高核桃油凝胶的起泡率。综上,超声处理可改善核桃油凝胶的结构与性质,使其成为人造奶油的良好替代品。

关键词:核桃油凝胶;蜂蜡;单甘酯;超声处理

中图分类号:TS205 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2024)01-0012-10

0 引言

人造奶油、起酥油等塑性脂肪可赋予食品特殊的质构、风味及功能特性,其消费量不断增大。但传统塑性脂肪的饱和脂肪酸或反式脂肪酸含量过高,会增加罹患糖尿病、肥胖、心血管疾病等代谢综合征风险,不利于人体健康^[1]。因此,食品工业亟待开发新型脂质替代传统塑性脂肪。油凝胶是指通过凝胶剂将液态油脂固定于三维网络中,形成类似半固体形态的凝胶物质,是传统塑性脂肪的健康型替代脂^[2]。近年来,研究者通过直接分散法、乳液模板

法、结构化双向法和油脂吸附法制备不同类型的油凝胶,并将其应用于烘焙产品、肉制品、冰淇淋、糖果等食品中^[3]。S. Y. Li 等^[4]研究发现,米糠蜡基和单甘酯基油凝胶具有与起酥油相似的流变特性和硬度,可替代起酥油制作曲奇。油凝胶的营养价值主要受油相组成的影响,而核桃油富含人体必需脂肪酸亚油酸、亚麻酸及生育酚等生物活性成分,是一种健康、优质的食用油资源^[5],可作为营养健康型油凝胶的油相配方。

凝胶剂对油凝胶的结构具有重要影响,单甘酯、蜂蜡、脂肪醇、植物蜡等低分子量凝胶剂被广泛应用

收稿日期:2023-08-25;修回日期:2023-12-05;出版日期:2024-02-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(BFUKF202312);国家重点研发计划项目(2022YFD1000104-03)

作者简介:张瑜(1990—),女,黑龙江省塔河县人,北京林业大学讲师,博士,主要研究方向为脂质科学与技术。E-mail:zhangyu2019@bjfu.edu.cn

于油凝胶的制备。在油凝胶形成过程中,凝胶剂通过氢键、范德华力、静电相互作用等生成结晶或自组装,使液态植物油固定在网络结构中而失去流动性,形成具有一定黏弹性和机械强度的类固体物质^[6]。单组分凝胶剂所形成的油凝胶往往存在析油、加工性能不足等缺陷,采用多组分凝胶剂复配,则可改变分子的排列和相互作用,形成增强的凝胶网络结构,捕获更多的液体油分子^[7]。通常,少量混合凝胶剂(质量分数为1%~10%)即可提供油凝胶所需的理想质构。

超声是一种频率大于20 000 Hz的声波,可在气体、固体、液体中传播^[8]。超声处理可改善脂肪的结晶行为,产生细致的结晶结构,提高脂肪的质构和塑性^[9]。M. Sharifi等^[10]研究发现,超声处理可使蜂蜡基橄榄油凝胶产生细小结晶,增强橄榄油凝胶的网络结构,使持油率(OBC)上升。F. Valoppi等^[11]研究发现,超声处理可溶解部分结晶而非诱导产生结晶,避免局部过饱和,使油凝胶形成更均一的体系。尽管上述研究报道了超声处理对橄榄油、大豆油、牛油果油凝胶晶体结构的影响,但油凝胶中油脂的组成,即脂肪酸碳链长度与不饱和度的差异,会显著影响油凝胶的结构特性和生物利用率。油脂不饱和度越高,所形成油凝胶的硬度、凝胶强度和OBC往往也越高^[12]。核桃油富含不饱和脂肪酸,既能给油凝胶提供一定的机械性能,又能补充人体必需脂肪酸。通过复合凝胶剂与超声耦合强化核桃油凝胶的特性,有利于拓展其在食品工业中的应用。

基于此,本文拟将蜂蜡与单甘酯复配后制备多组分凝胶剂,通过超声辅助制备核桃油凝胶,并探究超声处理对核桃油凝胶结构与性质的影响,以期超声在油凝胶领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

核桃油,滁谷食品有限公司;单硬脂酸甘油酯(简称单甘酯)、蜂蜡,均为分析纯,上海源叶生物科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

SCIENTZ-IIID型超声波细胞破碎仪,宁波新芝

生物科技股份有限公司;524G型数显恒温磁力搅拌器,上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司;TD5A型台式低速离心机,湖南赫西仪器装备有限公司;HW-SY21-KP6型电热恒温水浴锅,北京长风仪器仪表公司;IS5型傅里叶红外光谱(FTIR)仪,赛默飞世尔科技公司;MiniFlex 600型台式X-射线衍射(XRD)仪,日本理学(Rigaku)有限公司;OLYMPUS GX71型偏振光显微镜,日本OLYMPUS公司;MCR301型旋转流变仪,奥地利安东帕有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 核桃油凝胶制备 向核桃油中加入质量分数为8%的蜂蜡-单甘酯复合凝胶剂(蜂蜡与单甘酯质量比分别为0:10、1:9、1:4、3:7、2:3和1:1),在80℃条件下磁力搅拌并加热35 min,待凝胶剂充分溶解后,冷却至室温;置于4℃冰箱中冷藏24 h后取出,在室温下放置24 h。根据核桃油凝胶的OBC和表观形态,筛选蜂蜡与单甘酯的最佳质量比,以进行后续实验。

1.3.2 超声处理 选定蜂蜡与单甘酯最佳质量比后,研究复合凝胶剂融化前后超声处理对核桃油凝胶性质的影响。

1)融化前超声处理。在核桃油中加入最佳质量比的蜂蜡-单甘酯复合凝胶剂,分别经100 W-30 s、100 W-60 s、300 W-30 s和300 W-60 s超声处理后,在80℃条件下磁力搅拌并加热35 min,待凝胶剂充分溶解后,冷却至室温。将制备好的核桃油凝胶置于4℃冰箱中冷藏24 h后取出,在室温下放置24 h。

2)融化后超声处理。将核桃油与上述复合凝胶剂在80℃条件下磁力搅拌并加热35 min,待凝胶剂充分溶解后,分别经100 W-30 s、100 W-60 s、300 W-30 s和300 W-60 s超声处理,并冷却至室温。将制备好的核桃油凝胶置于4℃冰箱中冷藏24 h后取出,在室温下放置24 h。

1.3.3 OBC测定 参照徐杰等^[13]的方法,取适量核桃油凝胶于10 mL离心管中,称其质量记为 M_2 ,于9000 r/min条件下离心15 min,将离心管倒置10 min,用滤纸吸干沥出的核桃油,称其质量记为 M_3 。重复操作3次,取平均值。按下式计算

$OBC/\%$:

$$OBC = \frac{(M_2 - M_1) \times (1 - X) - (M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1) \times (1 - X)} \times 100\%$$

式中, M_1 为离心管的质量/g; X 为凝胶体系中凝胶剂的质量分数/%。

1.3.4 微观结构表征 取适量核桃油凝胶滴置于玻璃载玻片上,用盖玻片轻轻按压覆盖,使用偏振光显微镜观察其微观结构,放大倍数为 100 倍,利用相机进行图像采集。

1.3.5 FTIR 图谱测定 将核桃油凝胶置于红外灯下并使其处于微融状态,将其均匀涂抹在 KBr 压片上,待核桃油凝胶稳定后,将 KBr 压片放入 FTIR 仪中进行测定。扫描条件为:波数范围 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$,分辨率 4 cm^{-1} ,扫描 32 次取平均值,温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.6 XRD 图谱测定 取适量核桃油凝胶涂抹于 XRD 仪检测片上的凹槽内并将其刮平,于 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行测定。采用 Cu 靶作为放射源,操作电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA,在 2θ 为 $2^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围内扫描,扫描速度为 $2^{\circ}/\text{min}$,发射和防反射狭缝均为 1.0 mm,接收狭缝为 0.1 mm。使用 JADE 6.0 软件对 XRD 图谱进行分析。

1.3.7 热稳定性测定 参照 P. Y. Phoon 等^[14]的方法,取 2 g 左右核桃油凝胶于 10 mL 离心管中,分别置于 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴中加热 30 min 后,在室温、10 000 r/min 条件下离心 10 min,将离心管倒置 15 min 去除油脂,按照下式计算热稳定性:

$$\text{热稳定性} = 1 - \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100\%$$

式中, m_1 为加热前离心管与核桃油凝胶的质量和/g; m_2 为离心后离心管与核桃油凝胶的质量和/g; m_0 为核桃油凝胶的质量/g。

1.3.8 流变特性测定 选用配备温度控制系统的旋转流变仪,夹具选择 25 mm 平板,设置间隙为 1.0 mm,所有操作均在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行,施加应力范围为 0.001%~100%的振幅,扫描以确定 1 Hz 下的线性黏弹区(LVR),测定核桃油凝胶的储能模量(G')和损耗模量(G'')随剪切应力的变化。在 LVR

内以 0.1%的剪切应变进行频率扫描,剪切频率范围为 0.1~100 Hz。此外,对核桃油凝胶在 0.1~100 s^{-1} 剪切速率下进行黏度扫描。

1.3.9 起泡率和裱花性能测定 参照 M. Grossi 等^[15]的方法,称取质量为 m_a 的核桃油凝胶,使用电动搅拌器分别搅打 1 min、3 min、5 min、7 min、9 min、11 min、13 min 和 15 min,测定搅打充气后油凝胶的质量(m_b),按照下式计算起泡率:

$$\text{起泡率} = \frac{m_b - m_a}{m_a} \times 100\%$$

使用专用裱花袋将搅打好的核桃油凝胶挤成圆锥形,在室温条件下稳定 30 min,观察其光泽、形态和纹理度,判断核桃油凝胶的裱花性能。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,数据结果以(平均值±标准差)表示。使用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行单因素方差分析和邓肯多重范围检验以确定组间差异显著性($P < 0.05$)。采用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 蜂蜡与单甘酯最佳质量比的确定

OBC 可表征油凝胶体系束缚液相油使其不渗出的能力,是评价油凝胶内部网络结构紧密性的重要指标。蜂蜡与单甘酯质量比对核桃油凝胶 OBC 和表观形态的影响分别如图 1 和图 2 所示,其中不同小写字母表示数据具有显著性差异($P < 0.05$),下同。由图 1 可知,单独以单甘酯为凝胶剂时,核桃油凝胶的 OBC 较低,仅为 80.53%。以蜂蜡替代部分单甘酯后,核桃油凝胶的 OBC 显著增加。当蜂蜡与单甘酯质量比超过 1:4 后,核桃油凝胶的 OBC 均在 95%以上,但上升趋势减缓。此时,蜂蜡-单甘酯复合凝胶剂的质量分数虽仅为 8%,但所制备核桃油凝胶的 OBC 仍高于单甘酯质量分数为 16%的核桃油凝胶(83.87%)^[16]。由图 2 可知,以核桃油为油相,以不同质量比蜂蜡与单甘酯为凝胶剂的核桃油凝胶均呈浑浊、淡黄色;当蜂蜡与单甘酯质量比为 3:7 时,核桃油凝胶表面光滑,且边缘无明显析油现象。综合考虑,选择蜂蜡与单甘酯质量比为 3:7 制备复合凝胶剂进行后续研究。

2.2 超声处理对核桃油凝胶微观结构的影响

凝胶剂对油凝胶晶体结构的影响较大,已有研究^[17]表明,以蜂蜡为凝胶剂的油凝胶,其晶体结构呈细小的针状,相邻晶体距离较小,密度较大;而以甘油酯为凝胶剂的油凝胶,其晶体结构呈针状或聚集成簇,结构较松散^[18]。核桃油凝胶偏振光显微图像如图3所示。由图3可知,核桃油凝胶的晶体结构呈针状或片状,且晶体均匀分散于油相中。经超声处理后,核桃油凝胶晶体结构的尺寸变小,尤其是

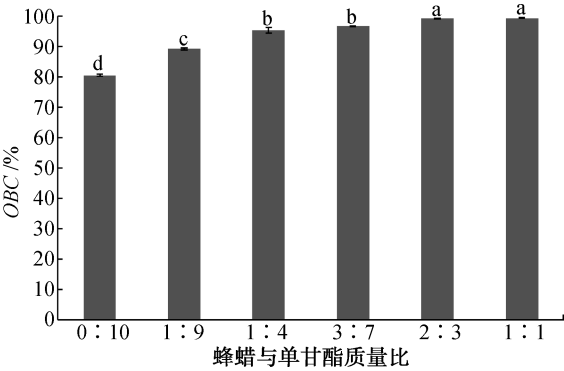


图1 蜂蜡与单甘酯质量比对核桃油凝胶 OBC 的影响

Fig. 1 Effect of beeswax and monoacylglycerol mass ratio on the OBC of walnut oil oleogels

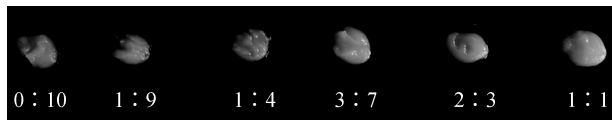


图2 蜂蜡与单甘酯质量比对核桃油凝胶表观形态的影响

Fig. 2 Effect of beeswax and monoacylglycerol mass ratio on the apparent morphology of walnut oil oleogels

采用融化后超声处理,所形成的晶型更致密。超声处理使液体产生空化效应,导致压力变化形成气泡,气泡破碎后局部产生高温、高压及高剪切作用,可能诱导初级成核;高剪切力破坏了晶体生长并促进二次成核,形成细小晶体;同时局部压力增大会导致过冷现象,上述作用均会对晶体的形成和形态产生影响^[19]。A. Giacomozzi 等^[9]研究发现,超声处理可减小油凝胶晶体的长度,使其尺寸分布更加均匀,与本研究结果较一致。

2.3 超声处理对核桃油凝胶 OBC 和热稳定性的影响

超声处理对核桃油凝胶 OBC 的影响如图4所示。由图4可知,复合凝胶剂融化前后经超声处理制备的核桃油凝胶,其 OBC 均高于未超声处理组,表明超声处理有助于提升油凝胶的 OBC。在复合凝胶剂融化前进行超声处理,有助于凝胶剂在油相中的溶解和分散,并有利于核桃油凝胶的生成。100 W 超声处理即可较好地促进凝胶剂与油相的相互作用,显著提高核桃油凝胶的 OBC,但继续增加超声功率,核桃油凝胶的 OBC 并未进一步提高。在复合凝胶剂融化后进行超声处理,可能会影响核桃油凝胶中晶体的形成。在相同超声功率下,随着超声时间的延长,核桃油凝胶的 OBC 呈下降趋势,这可能是因为长时间的超声处理破坏了部分核桃油凝胶晶体紧密的堆积结构;而相同超声时间下,强超声功率使核桃油凝胶的 OBC 更高,这可能是因为超声过程中释放的热量可促进蜂蜡、单甘脂与核桃油三者的融合。

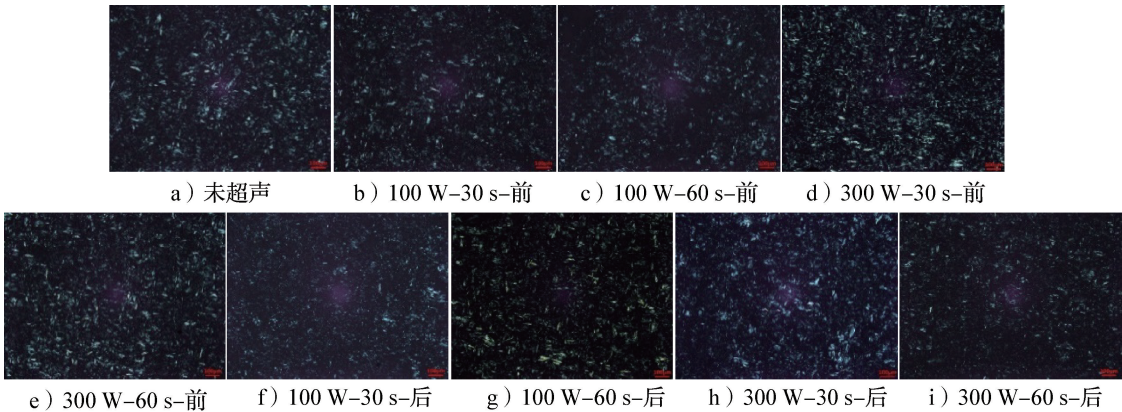


图3 核桃油凝胶偏振光显微图像

Fig. 3 Polarized light micrographs of walnut oil oleogels

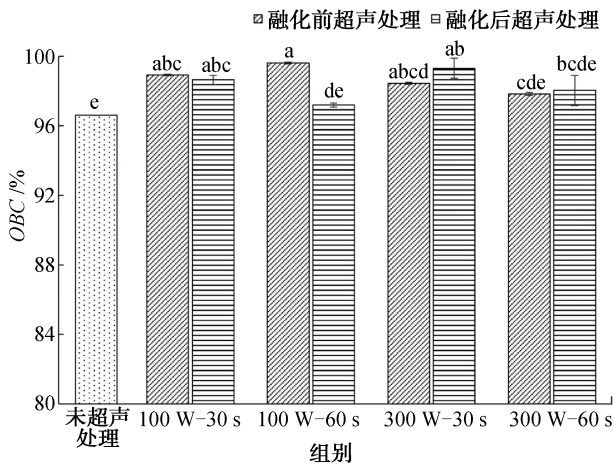


图 4 超声处理对核桃油凝胶 OBC 的影响
Fig. 4 Effect of ultrasound treatment on the OBC of walnut oil oleogels

经 60 °C 加热后,油凝胶温度达到凝胶剂的熔点,凝胶结构完全崩塌,液态油全部释放,无法计算其热稳定性。超声处理对核桃油凝胶热稳定性的影响如图 5 所示。由图 5 可知,当加热温度从 30 °C 上升至 50 °C 时,所有核桃油凝胶均出现析油现象,且热稳定性随温度升高均呈下降趋势。对比不同超声处理所制备核桃油凝胶的热稳定性可知,适当的超声处理可提高核桃油凝胶的热稳定性,尤其是采用在复合凝胶剂融化后经 100 W-30 s 超声处理,可显著提高核桃油凝胶在各加热温度下的稳定性。

2.4 超声处理对核桃油凝胶晶型和分子间作用力的影响

α 晶型的短间距特征峰出现在 4.15 Å 附近, β' 晶型的短间距特征峰出现在 4.20 Å 和 3.80 Å 附近,而 β 晶型的短间距特征峰出现在 4.60 Å 附近。不同超声处理下核桃油凝胶的 XRD 图谱如图 6 所示。由图 6 可知,所有核桃油凝胶 XRD 图谱中的衍射峰相似,均在 3.80 Å、4.15 Å 和 4.60 Å 附近出现衍射峰,表明核桃油凝胶体系内同时存在 α 、 β 和 β' 这 3 种晶型。比较不同超声处理所制备的核桃油凝胶可知,超声处理未改变核桃油凝胶的结晶形态。L. T. Li 等^[20] 研究也发现,超声处理未改变小烛树蜡-坚果油凝胶的结晶形态,但会增强其晶体强度。

不同超声处理下核桃油凝胶的 FTIR 图谱如图 7 所示。由图 7 可知,单甘酯在 3500~3200 cm⁻¹ 处出现分子间氢键的特征峰;而核桃油、蜂蜡和所有核

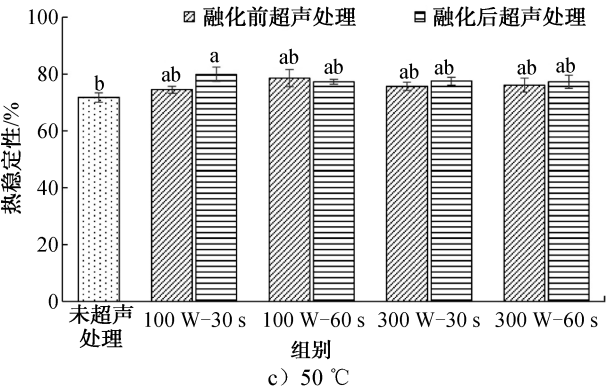
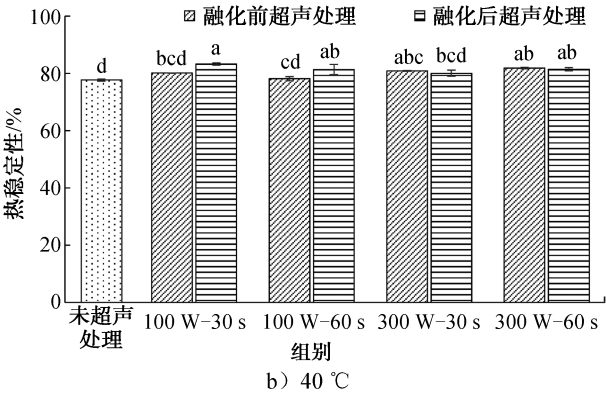
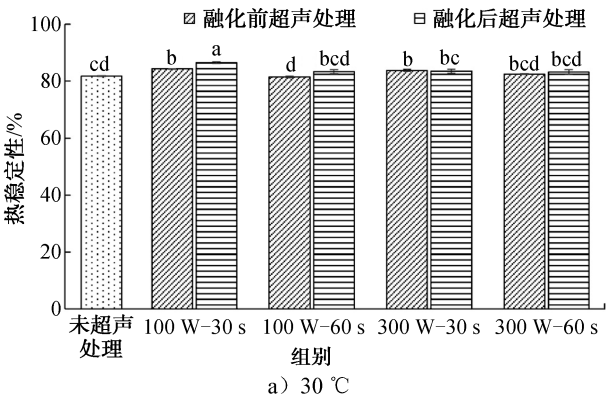


图 5 超声处理对核桃油凝胶热稳定性的影响
Fig. 5 Effect of ultrasound treatment on the thermal properties of walnut oil oleogels

桃油凝胶在此处均未出现特征峰。E. Yilmaz 等^[21] 以单甘酯、蜂蜡为单组分凝胶剂制备榛果油凝胶,发现单甘酯基榛果油凝胶在 3400~3300 cm⁻¹ 处存在较宽的特征吸收峰,推测是单甘酯与葵花籽油形成了较弱的分子间氢键所致;而蜂蜡基榛果油凝胶不存在此特征峰。在本研究中,所有核桃油凝胶中均未出现单甘酯在 3500~3200 cm⁻¹ 处的特征峰,表明蜂蜡会干扰单甘酯的氢键作用,影响单甘酯的结晶行为。对比不同超声处理下核桃油凝胶的 FTIR 图谱,未发现显著差异,表明超声处理未对油凝胶内部

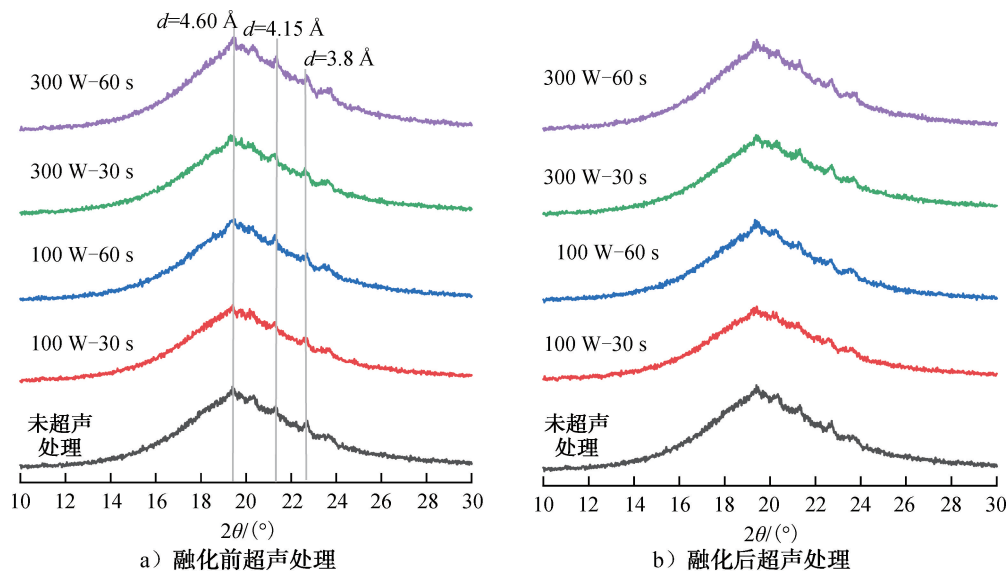


图 6 不同超声处理下核桃油凝胶的 XRD 图谱
Fig. 6 Effect of ultrasound treatment on the XRD spectras of walut oil oleogels

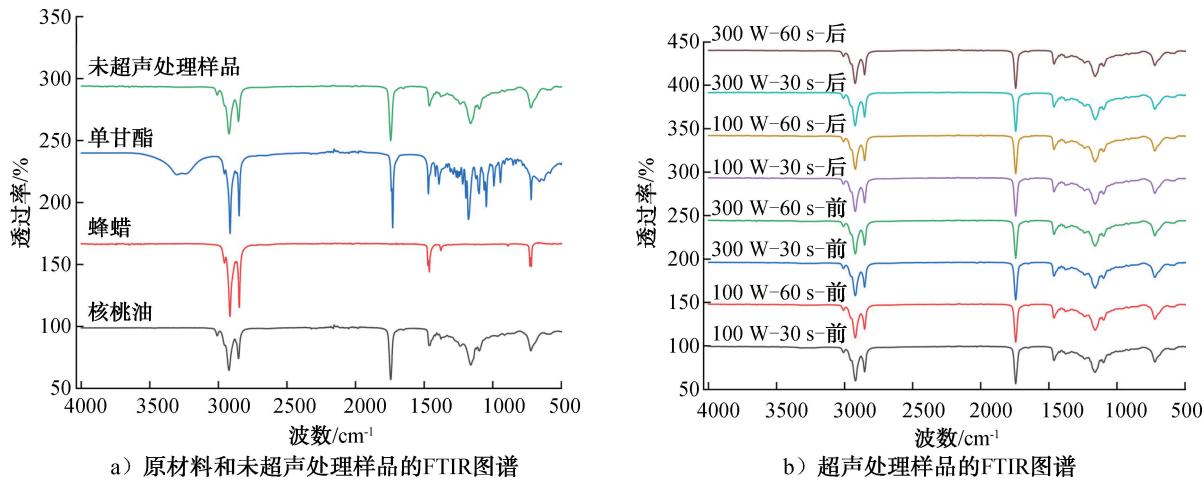


图 7 不同超声处理下核桃油凝胶的 FTIR 图谱
Fig. 7 Effect of ultrasound treatment on the FTIR patterns of walut oil oleogels

的分子间作用力产生影响。

2.5 超声处理对核桃油凝胶流变特性的影响

2.5.1 黏度 超声处理对核桃油凝胶黏度的影响如图 8 所示。由图 8 可知,随着剪切速率的增加,所有核桃油凝胶的黏度均呈下降趋势,表明其属于假塑性流体。复合凝胶剂融化前经超声处理所制备核桃油凝胶的黏度与未超声处理组相差不大;而复合凝胶剂融化后短时间(30 s)超声处理对核桃油凝胶的黏度影响较小,但较长时间(60 s)超声处理可使核桃油凝胶黏度降低。

2.5.2 G' 和 G'' 核桃油凝胶的应力扫描和频率扫描图如图 9 所示。由图 9 可知,在 LVR 范围内,所

有核桃油凝胶的 $G'>G''$,表明形成了较紧密的凝胶结构,且表现出类固体的弹性性质。对比不同超声处理模式,复合凝胶剂融化前后经 100 W-30 s 超声处理所制备核桃油凝胶的 LVR 均较其他油凝胶更宽,表明该条件所制备核桃油凝胶的结构化程度更高,具有较强的机械性能。在复合凝胶剂融化前进行短时间超声处理,可提高核桃油凝胶晶体间的相互作用,形成结构更致密、弹性更强的凝胶体系;而在复合凝胶剂融化后进行超声处理,可能会影响核桃油凝胶晶体原有的紧密排布,使体系的弹性下降。随着剪切应力的增加, G' 与 G'' 出现交叉,表明凝胶结构遭到破坏,发生了从黏弹性固体向液体转变的

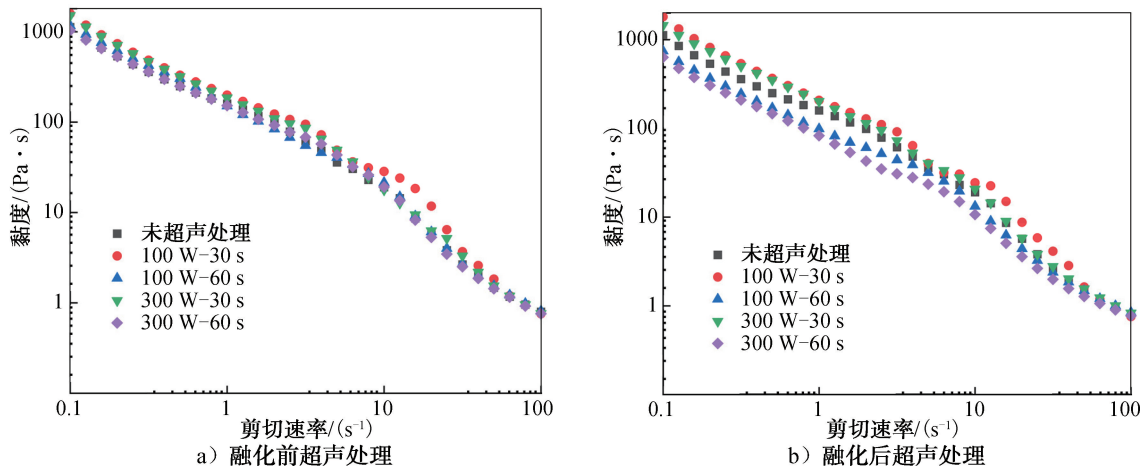


图 8 超声处理对核桃油凝胶黏度的影响

Fig. 8 Effect of ultrasound treatment on the viscosity of walnut oil oleogels

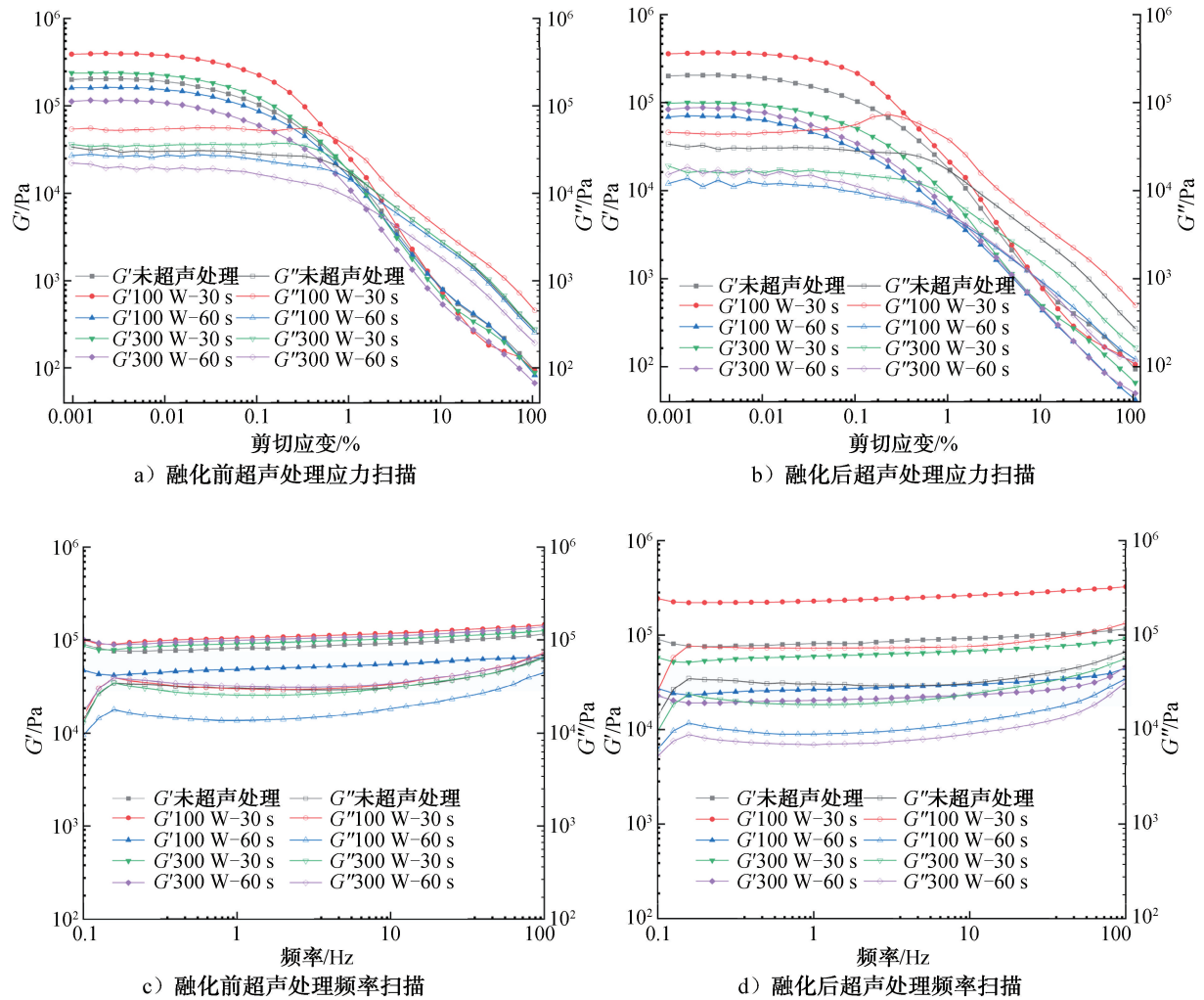


图 9 核桃油凝胶的应力扫描和频率扫描图

Fig. 9 Amplitude sweeps and frequency sweeps of walnut oil oleogels

行为。随着频率的增加,核桃油凝胶体系均呈现 $G' > G''$,且不受频率的影响。A. Giacomozzi 等^[9]研究

发现,超声处理可显著提高油凝胶的 G' ,有利于形成弹性较强的凝胶网络结构。A. Rumayor-Escobar

等^[22]研究发现,超声处理会降低单甘酯基大豆油凝胶的 G' ,表明超声处理会扰乱单甘酯晶体间较弱的相互作用。因此,适度超声处理对改善核桃油凝胶的结构和性质具有重要影响。

2.6 超声处理对核桃油凝胶起泡率和裱花性能的影响

对油凝胶进行搅打时,其内部部分晶体网络可捕捉气泡,形成低能量密度的油泡沫^[19]。油凝胶中晶体的形态和尺寸对油泡沫的结构和性质具有重要影响,且晶体对连续相中气泡的形成和稳定起着重要作用^[15]。超声处理可改善油凝胶的晶体结构,推测其会影响油泡沫的形成。不同搅打时间下核桃油凝胶起泡率的变化如图 10 所示。由图 10 可知,初始搅打过程中,核桃油凝胶起泡率较低,为 20%~40%,此时核桃油凝胶内部存在大量小而分布均匀的气体,结构较刚硬,空气渗入率较低^[23]。随着搅打时间的延长,核桃油凝胶的起泡率呈上升趋势。搅打使核桃油凝胶完全“软化”后,可增加空气的渗

入率,也有利于界面处晶体的吸附,使油泡沫大小、分布均匀^[24]。不同超声处理所制备核桃油凝胶的起泡率总体上均大于未超声处理组。在复合凝胶剂融化前进行超声处理,所制备核桃油凝胶的起泡率(120.56%~125.54%)均略高于未超声处理组(114.53%)。在复合凝胶剂融化后经 100 W-60 s 超声处理下的核桃油凝胶,其起泡率明显高于未超声处理组,且起泡率在搅打时间为 9 min 时最高,可达 144.73%。当搅打时间继续延长至 9~11 min,起泡率逐渐降低,此时分布均匀的油泡沫发生部分聚集。

核桃油凝胶的裱花性能如图 11 所示。由图 11 可知,复合凝胶剂融化前后超声处理所制备核桃油凝胶的裱花形态稳定、纹路清晰,放置 30 min 后无明显塌陷,稳定性较好。综上可知,经超声处理的核桃油凝胶具有良好的起泡率和裱花性能,同时兼具核桃油富含不饱和脂肪酸的营养特性,是一种健康的新型塑性脂肪,可作为人造奶油的良好替代品。

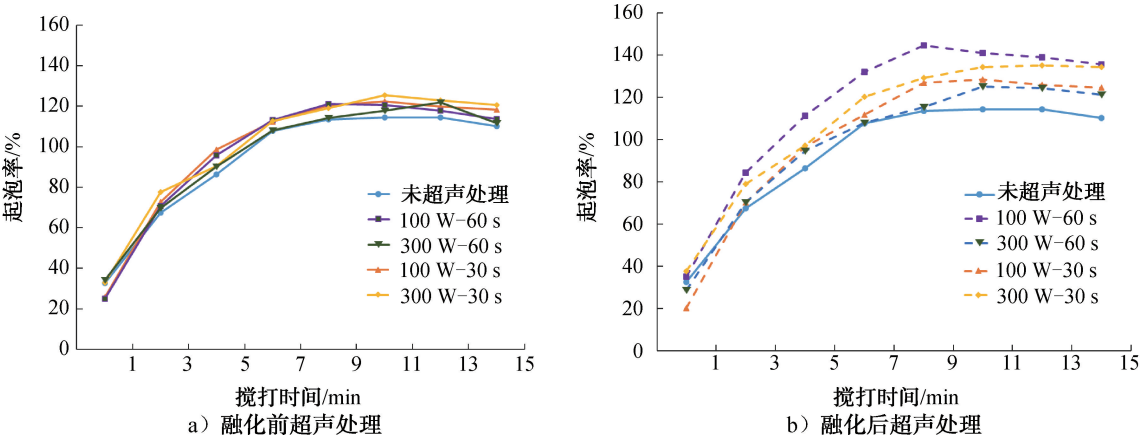


图 10 不同搅打时间下核桃油凝胶起泡率的变化
Fig. 10 The overrun value change of walnut oil oleogels at different whipping time

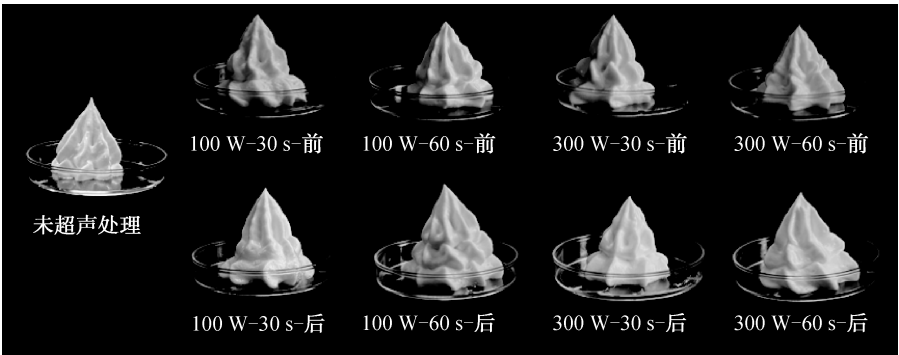


图 11 核桃油凝胶的裱花性能
Fig. 11 Rosette appearance of walnut oil oleogels

3 结论

本研究以核桃油为基料油,以蜂蜡-单甘酯复合凝胶剂构建核桃油凝胶体系,探究了不同超声处理对蜂蜡-单甘酯基核桃油凝胶结构与性质的影响,得到如下结论:当蜂蜡与单甘酯质量比为3:7时,所制备的复合凝胶剂可赋予核桃油凝胶较高的OBC且无明显析油现象;复合凝胶剂融化前后超声处理均能提高核桃油凝胶的OBC和热稳定性;超声处理所制备核桃油凝胶的晶体为细小、致密的针状结构,且超声处理未改变核桃油凝胶体系中的晶体结构及分子内的相互作用力;超声处理所制备核桃油凝胶具有更高的起泡率,且裱花性能良好,具有替代人造奶油的潜力。未来可以该油凝胶或油泡沫为基料负载不同功能因子和风味成分,制备兼具营养和感官特性的塑性脂肪,并将其应用于实际食品生产中。

参考文献:

- [1] ISLAM M A, AMIN M N, SIDDIQUI S A, et al. Trans fatty acids and lipid profile: A serious risk factor to cardiovascular disease, cancer and diabetes [J]. *Diabetes & Metabolic Syndrome (Clinical Research & Reviews)*, 2019, 13 (2): 1643-1647.
- [2] 曹振宇, 刘泽龙, 张慧娟, 等. 食用植物油脂凝胶化技术研究进展 [J]. *食品油脂*, 2019, 44 (8): 57-64.
- [3] 柴秀航, 张帅, 刘元法. 结构化油脂及其在烘焙产品中的应用研究进展 [J]. *食品科学*, 2022, 43 (15): 336-344.
- [4] LI S Y, WU G C, LI X J, et al. Roles of gelator type and gelation technology on texture and sensory properties of cookies prepared with oleogels [J]. *Food Chemistry*, 2021, 356: 129667.
- [5] XU Y Y, SUN H, LYU J, et al. Effects of polysaccharide thickening agent on the preparation of walnut oil oleogels based on methylcellulose: Characterization and delivery of curcumin [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 232: 123291.
- [6] MAO L K, LU Y, CUI M N, et al. Design of gel structures in water and oil phases for improved delivery of bioactive food ingredients [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60 (10): 1651-1666.
- [7] SIVAKANTHAN S, FAWZIA S, MADHUJITH T, et al. Synergistic effects of oleogelsators in tailoring the properties of oleogels: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21 (4): 3507-3539.
- [8] FROLOVA Y, SARKISYAN V, SOBOLEV R, et al. Ultrasonic treatment of food colloidal systems containing oleogels: A review [J]. *Gels*, 2022, 8 (12): 801.
- [9] GIACOMOZZI A, PALLA C, CARRI M E, et al. Tailoring physical properties of monoglycerides oleogels using high-intensity ultrasound [J]. *Food Research International*, 2020, 134: 109231.
- [10] SHARIFI M, GOLI S A H, FAYAZ G. Exploitation of high-intensity ultrasound to modify the structure of olive oil organogel containing propolis wax [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54 (2): 509-515.
- [11] VALOPPI F, SALMI A, RATILAINEN M, et al. Controlling oleogels crystallization using ultrasonic standing waves [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 14448.
- [12] MILLAO S, ITURRA N, CONTARDO I, et al. Structuring of oils with high PUFA content: Evaluation of the formulation conditions on the oxidative stability and structural properties of ethylcellulose oleogels [J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134772.
- [13] 徐杰, 孙浩, 张国红, 等. 核桃油基油凝胶的制备及特性研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46 (5): 188-193.
- [14] PHOON P Y, HENRY C J. Fibre-based oleogels: Effect of the structure of insoluble fibre on its physical properties [J]. *Food Function*, 2020, 11 (2): 1349-1361.
- [15] GROSSI M, FANG B C, RAO J J, et al. Oleofoams stabilized by monoacylglycerides: Impact of chain length and concentration [J]. *Food Research International*, 2023, 169: 112914.
- [16] 徐杰. 核桃油基油凝胶的制备、结构及稳定性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [17] 孟宗, 李陆茵, 李兴伟, 等. 植物蜡及液态植物油构建油凝胶的物性研究 [J]. *中国油脂*, 2019, 44 (11): 17-22.
- [18] FERRO A C, DE SOUZA PAGLARINI C, RODRIGUES POLLONIO M A, et al. Glyceryl monostearate-based oleogels as a new fat substitute in meat emulsion [J]. *Meat Science*, 2021, 174: 108424.
- [19] DA SILVA T L T, ARELLANO D B, MARTINI S. Use of high-intensity ultrasound to change the physical properties of oleogels and emulsion gels [J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2019, 96 (6): 681-691.
- [20] LI L T, TAHA A, GENG M J, et al. Ultrasound-assisted gelation of β -carotene enriched oleogels based on candelilla wax-nut oils: Physical properties and *in-vitro* digestion analysis [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 79: 105762.
- [21] YILMAZ E, ÖĞÜTCÜ M. Properties and stability of hazelnut oil organogels with beeswax and monoglyceride

[J]. Journal of the American Oil Chemists Society,2014, 91(6):1007–1017.

[22] RUMAYOR-ESCOBAR A, PEÑA M M L, ROSA-MILLÁN J D L. Effect of high intensity ultrasound on soybean and avocado oleogels’ structure and stability[J]. Food Structure,2023,36:100315.

[23] GU X Y, DU L Y, MENG Z. Thermal-reversible lacquer wax-based oleofoams in dual stabilization with high ambient stability[J]. Food Research International,2023,167: 112650.

[24] DU L Y, JIANG Q B, LI S Y, et al. Microstructure evolution and partial coalescence in the whipping process of oleofoams stabilized by monoglycerides[J]. Food Hydrocolloids,2021,112:106245.

Effect of ultrasound treatment on the structure and properties of walnut oil oleogels based on the beeswax-monoacylglycerol

ZHANG Yu^{1,2}, XUE Yushu^{1,2}, SHEN Yijie^{1,2}, SONG Kairuo^{1,2}, WANG Fengjun^{1,2}

1. Beijing Key Laboratory of Forest Food Processing and Safety, Beijing 100083, China;
2. College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The walnut oil oleogels prepared by beeswax and monoglyceride was used as the research object and the effects of ultrasound treatment before or after complex oleogelators melting on the structure and properties of the walnut oli oleogels were explored. The research results indicated that when the mass ratio of beeswax to monoglyceride was 3 : 7, the formed walnut oil oleogels had an oil bonding capacity (*OBC*) of over 95% and a smooth and stable surface morphology. All walnut oleogels showed solid-like elastic properties within a certain shear strain range, and the walnut oil oleogels prepared with 100 W-30 s parameters had the strongest mechanical properties. Ultrasound treatment could improve the crystal structure of walnut oil oleogels, produce more compact and fine crystal morphology, and effectively enhance *OBC* and thermal stability of walnut oil oleogels. The oleofoams obtained by whipping the oleogels exhibited excellent decorative performance, and ultrasound treatment could significantly increase the overrun of the walnut oil oleogels. In sum, ultrasound treatment could improve the structure and properties of walnut oil oleogel, and make it a good substitute for margarine.

Key words: walnut oil oleogel; beeswax; monoacylglycerol; ultrasound treatment

[责任编辑:杨晓娟]

本刊数字网络传播声明

本刊已许可中国知网,万方数据资源系统,维普网,国家科技学术期刊开放平台,博看网,超星,中国科技论文在线,中教数据库,长江文库,CABI,CA, AJ. VINITI, EBSCOhost, Ulrichs, FSTA 等在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。