

基于毛细管作用的抗性糊精-蔗糖结构化油脂制备及其在风味夹心酱中的减糖应用

樊培培, 孔凡, 郭健*, 杨晓泉

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 随着慢性非传染性疾病的高发, 过量糖摄入是肥胖、糖尿病和心血管疾病的重要风险因素, 减糖成为食品加工的重要方向。为了开发具有减糖潜力的食品结构体系并提升甜度感知效果, 本研究基于毛细管作用构建抗性糊精-蔗糖/水/葵花籽油 (Resistant Dextrin-Sucrose/Water/Sunflower Oil, RD-SUC/W/SFO) 结构化油脂, 探究其在风味夹心酱中的减糖应用。通过调控水分含量, 结合流变学测试、油结合力测定和显微结构观察, 分析不同含水量对结构化油脂微观结构、网络强度及触变恢复性能的影响, 并将其应用于草莓奶香风味夹心酱中, 通过感官评价评估其减糖效果与感官品质。结果表明, 当水分含量为 0.75‰ 时, 结构化油脂表现出最佳油结合力 (83.11%)、屈服应力 (21.65 Pa) 及触变恢复率 (92.58%)。在夹心酱应用中, 该结构化油脂可显著增强甜味感知, 实现蔗糖用量降低超过 20%, 且口感和质构与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。本研究成功制备了 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂, 并证明其在风味夹心酱中的减糖潜力, 为减糖型食品的开发提供了新思路与技术路径。

关键词: 结构化油脂; 毛细管作用; 减糖; 夹心酱

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0322

Preparation of Resistant Dextrin-Sucrose Structured Lipids Based on Capillary Action and Their Application in Sugar Reduction of Flavored Filling Cream

FAN Peipei, KONG Fan, GUO Jian*, YANG Xiaoquan

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With the increasing prevalence of chronic non-communicable diseases, excessive sugar consumption has been identified as a major risk factor for obesity, diabetes, and cardiovascular diseases. Consequently, sugar reduction has become an important direction in food processing. To develop food structural systems with sugar-reduction potential while enhancing sweetness perception, a structured lipid system based on capillary action was constructed using resistant dextrin-sucrose/water/sunflower oil (RD-SUC/W/SFO), and its potential application for sugar reduction in flavored filling creams was investigated. By regulating the water content, rheological measurements, oil-binding capacity analysis, and microscopic observations were conducted to systematically evaluate the effects of moisture levels on the microstructure, network strength, and thixotropic recovery behavior of the structured lipid system. The structured lipid was further incorporated into a strawberry milk-flavored filling cream, and its sugar-reduction performance as well as sensory quality were assessed through sensory evaluation. The results indicated that when the water content was 0.75‰, the structured lipids exhibited superior oil holding capacity (83.11%), yield stress (21.65 Pa), and thixotropic recovery (92.58%). When applied in filling cream systems, they markedly enhanced sweetness perception, allowing for a reduction in sucrose content by over 20% without compromising sensory attributes or textural properties compared with the control ($P>0.05$). In conclusion, an RD-SUC/W/SFO structured lipid system was successfully developed, and its potential application for sugar reduction in flavored filling creams was demonstrated. This study provides a novel strategy and technical approach for the development of reduced-sugar food products.

Key words: structured lipids; capillary action; sugar reduction; filling cream

收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-05-27; 接受日期: 2026-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2101302)

作者简介: 樊培培 (2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品结构化技术与减糖应用, E-mail: 18567710526@163.com

通讯作者: 郭健 (1982-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 胶体结构构建与应用, E-mail: feguojian@scut.edu.cn

随着居民膳食结构的变化和慢性非传染性疾病发病率的上升,过量摄入添加糖已成为肥胖、2型糖尿病及心血管疾病的重要风险因素之一^[1]。在健康需求驱动下,“清洁标签”、“三减”(减盐、减油、减糖)成为食品创新的重要方向,这一变化对传统食品加工技术提出挑战。蔗糖(Sucrose, SUC)在烘焙食品、糖果及夹心类制品中不仅提供甜味,还参与质构形成、色泽褐变以及延长保质期。然而,现行减糖策略面临多重限制,人工甜味剂如阿斯巴甜存在代谢风险争议^[2],糖醇类物质(如赤藓糖醇)无法参与美拉德反应^[3],直接降低蔗糖用量则易导致产品品质构塌陷、风味失衡及消费者接受度下降^[4]。因此,在保持蔗糖功能特性的前提下实现有效减糖,仍是食品工业面临的重要技术挑战。

甜味感知的生理机制表明,当蔗糖颗粒进入口腔后,其表面蔗糖分子迅速溶解于唾液中形成甜味溶液,该溶液中释放的分子扩散结合味蕾上的甜味受体,最终通过一系列神经传导在大脑皮层整合,使人们感受到甜味^[5,6]。而蔗糖颗粒内部尚未溶解的蔗糖分子并未直接参与这一感知过程。基于这一原理,结合膳食纤维不产生热量^[7]的特点,本研究团队以不同膳食纤维作为填充物填充至蔗糖晶粒内部,筛选了膳食纤维种类和添加量,制备出热量低并且能在减少蔗糖用量的同时保持甜味的结构化颗粒,做到“减糖不减甜”^[8]。其中,抗性糊精(Resistant Dextrin, RD)所制备的抗性糊精-蔗糖(RD-SUC)结构化颗粒在颜色属性、粉体性质和溶解性方面均具有优势。

结构化油脂是通过物理或化学方式,将液态油转变为半固体或固体状态体系的技术,其核心在于通过三维网络结构将油脂物理固定,以改善油脂的质构、流变性能及感官属性^[9],主要通过非共价相互作用(如范德华力、氢键或毛细作用)限制油相流动,实现油相自支撑的凝胶体系^[10]。然而,在高脂食品体系中,单纯依赖RD-SUC结构化颗粒构建填充型油相网络虽可在一定程度上实现结构支撑与减糖,但其网络稳定性和油结合能力仍显不足。对此,毛细管聚集作用是基于颗粒悬浮液体系中次级流体的引入及其产生的液桥效应^[11]。当少量水(次级流体)加入疏水性的颗粒油悬浮液时,水优先润湿亲水性颗粒表面,形成颗粒间的液桥,进而通过毛细力诱导颗粒聚集,形成三维网络结构^[12],且该液桥已通过显微与荧光方法得到直接观测^[11,13]。本团队前期研究表明,通过在颗粒-油悬浮体系中加入微量水,可使蛋白质颗粒之间形成液桥并增强颗粒间吸引力,可在油相中构建三维网络结构,从而将液态油物理捕获形成自支撑的油凝胶体系^[14]。这为油相结构化提供了可行策略。在此基础上,结构化油脂作为一种新型脂质调控技术,不仅可用于优化脂肪结构、替代传统固体脂肪^[15],还可通过调控食品微观结构影响食品的质构特性及感官体验^[16],在减糖体系中展现出潜在应用价值。

基于上述背景,本研究以RD-SUC结构化颗粒为研究对象,在葵花籽油(Sunflower Seed Oil, SFO)体系中引入微量水分,利用毛细管作用放大颗粒间相互作用,构建抗性糊精-蔗糖/水/葵花籽油(RD-SUC/W/SFO)结构化油脂体系,实现其在高脂食品中的减糖应用。通过油结合力测定、流变学分析及显微观察,探讨水分含量对结构化油脂流变特性及凝胶网络的影响,并评价其在夹心饼干夹心酱中的应用。制作夹心酱并填充饼干,通过感官评价分析甜度、口感、质构及与饼干片的黏合力,为减糖夹心食品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

抗性糊精(食品级,符合国家食品添加剂标准),购于河南万邦化工科技有限公司;蔗糖(纯度大于99.8%),购于广州福正东海食品有限公司;葵花籽油,购于金太阳粮油股份有限公司;尼罗红染料,购于Sigma-aldrich(上海)贸易有限公司;饼干,购于漳州市谷利麦食品有限公司;草莓香精,购于英国健康食品公司;香兰素,购于商丘青山香精香料有限公司。实验用水为去离子水(15.0 MΩ cm)。

1.2 仪器与设备

PM-100行星式球磨机,德国Restch公司;CG-9230粉碎机,中山市长柏电器实业有限公司;NBW-3020电加热平台,东莞市鑫耀五金工具有限公司;CG-9230粉碎机,中山市长柏电器实业有限公司;RW 20 digital数显型顶置式搅拌器,德国IKA公司;DHG-9203A电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;59E红外测温仪,美国FLUKE公司;TCS SPE激光共聚焦显微镜,德国Leica公司;BX51偏光显微镜,日本奥林巴斯公司;HAAKE MARS60哈克旋转流变仪,美国Thermo公司;SORVALL ST 16R高速离心机,美国Thermo公司。

1.3 实验方法

1.3.1 RD-SUC 结构化颗粒的制备

RD-SUC 结构化颗粒的制备参考 Rai 等^[17]的方法并做适当调整,包括蔗糖溶液的浓缩、抗性糊精的分散与冷却结晶和干燥与粉碎处理三个步骤,如图 1 所示。首先将去离子水与蔗糖按照 8:3 质量比混合均匀,得到糖度为 72.0 Brix 的初始糖液。将糖液置于电加热台加热搅拌,持续监测糖液温度,通过预实验建立的糖液浓度-沸点线性关系,确定当温度升至 121 °C 时,糖液浓度达到 91.0 Brix。停止加热,此时糖液因过饱和呈现轻微浑浊,表明达到结晶临界点。然后向浓缩糖液中加入抗性糊精粉末。使用立式搅拌器以 300 r min⁻¹ 的转速持续搅拌,直至温度降至 45 °C。此过程中,抗性糊精(添加量为 20%)被掺入蔗糖晶体孔隙结构,形成抗性糊精-蔗糖聚集体。最后将聚集体置于 45 °C 的烘箱中干燥 12 h,干燥后物料经粉碎机处理,过 200 目筛,获得均一的 RD-SUC 结构化颗粒(含 20%抗性糊精、80%蔗糖)。

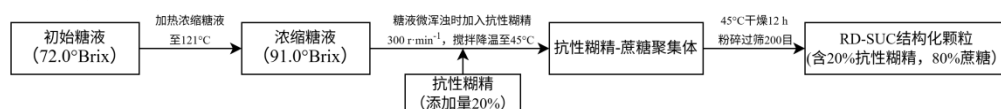


图 1 RD-SUC 结构化颗粒的制备流程

Fig.1 Preparation of RD-SUC Structured Particles

热力学分析显示,该颗粒熔融峰值温度(175.45 °C)和熔化焓(45.01 J g⁻¹)较纯蔗糖(194.18 °C、128.90 J g⁻¹)显著降低,熔融峰宽化,结晶度下降;X 射线衍射证实抗性糊精以无定形形式嵌入蔗糖晶体中,未形成新物相。该颗粒颜色与蔗糖高度接近(色差值 $\Delta E=1.34$),溶解速率与蔗糖基本相当,该颗粒的平均粒径(24.12 μm)与蔗糖的平均粒径(23.08 μm)相近。其是经系统筛选后性能最优的减糖配料,本研究采用该配比进行后续制备与分析。

1.3.2 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的制备

RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的制备步骤是将 RD-SUC 结构化颗粒与 SFO 两种组分进行高效混合,如图 2 所示。将 RD-SUC 结构化颗粒以球磨方式(300 r min⁻¹, 25 min)均匀分散于 SFO 中;在球磨进行至 15 min 时,根据实验设计定量添加微量水,为精确控制水分含量,采用微量移液器按体系总质量计算水量。例如 10.00 g 体系,0.75‰ 对应添加 7.5 μL 水,水分在球磨过程中缓慢滴加以保证均匀分散,混合后体系最终呈半固态凝胶状态。各实验组含水量设定为 0.00‰、0.75‰、1.50‰、3.00‰、4.50‰、6.00‰ 和 7.50‰,样品编号按“SLs+水分含量(×100)”规则,例如含水量 0.75‰ 的样品记为 SLs75。在该过程中,所添加的微量水作为次级流体,旨在在 RD-SUC 颗粒之间诱导形成液桥结构,从而通过毛细管力增强颗粒间相互作用并构建网络结构。除特别说明外,本文后续所述 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂,均指 20% RD 含量下 42.86% RD-SUC 含量的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂。

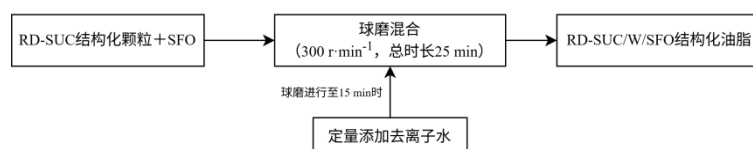


图 2 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的制备流程

Fig.2 Preparation of RD-SUC/W/SFO Structured Lipids

1.3.3 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的流变学测试

RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的流变学特性在 25 °C 标准室温条件下测定。为减小壁滑效应,采用锯齿状平行板夹具(P35/TI/SE, 直径 35 mm),样品加载间隙为 1.00 mm。所有样品在正式测试前静置松弛 3 min,以消除残余应力。测试内容包括黏度扫描、应变扫描、频率扫描及触变性测试。黏度扫描在剪切速率 0.01~100 s⁻¹ 范围内进行;应变扫描在 1.00 Hz 条件下,于 $\gamma=0.01\%\sim100.00\%$ 范围内测定,以确定线性黏弹性区;频率扫描在 $\gamma=0.05\%$ 的线性黏弹性区内,于 0.1~10.0 Hz 范围内进行,以获得储能模量(G')和损耗模量(G'')随频率的变化规律。在上述测试基础上,进一步开展三阶段触变性测试:0~600 s 和 700~1 300 s 采用低剪切速率(0.1 s⁻¹),700~800 s 采用高剪切速率(10 s⁻¹)来测量表观黏度曲线,通过第三阶段与第一阶段最终表观黏度之比来衡量样品在高剪切后的恢复能力。

1.3.4 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的油结合力(Oil Binding Capacity, OBC)

结构化油脂的油结合力的测定,是使用离心法分离颗粒与液态油得到的^[18]。取约 1.00 g 结构化油脂样品(m_1)置于 2.00 mL 容量的塑料离心管(m_0),以 8 000 r min⁻¹转速离心 10 min,随后将离心管倒置 5 min,以去除被分离的液态油,去除游离液态油后的离心管、样品总质量为 m_2 ,油结合力按照公式(1)计算:

$$OBC = \frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

OBC——结构化油脂的油结合力, %;

m_1 ——结构化油脂样品质量, g;

m_2 ——去除游离液态油后的离心管、样品总质量, g;

m_0 ——塑料离心管质量, g。

1.3.5 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的微观结构

RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的微观结构采用激光共聚焦显微镜(CLSM)和偏光显微镜进行表征^[19]。CLSM 观察中,以尼罗红(0.1 wt%)作为荧光染料,按 100 mL SFO 加入 1 mL 尼罗红溶液的比例混合均匀,用其制备结构化油脂;取少量样品置于载玻片,在 40 倍放大条件下观察油相结构及分布,激发波长为 488 nm。偏光显微观察中,将少量结构化油脂置于载玻片并覆盖盖玻片压平,在 20 倍放大条件下采用偏光模式观察并记录样品中蔗糖晶体的形貌及其分布特征。

1.3.6 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂草莓奶香风味夹心酱的制备

向 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂中加入香兰素、草莓香精,使用高效混合方式(200 r min⁻¹, 10 min)混合均匀,配方比例以质量百分比计:RD-SUC/SFO 结构化油脂 98.50%,香兰素(用于增强奶香风味)0.10%,草莓香精(赋予草莓果香)0.05%。下简称实验组夹心酱。对照样为 SUC/SFO 结构化油脂夹心酱,制备方法同上,区别在于将 RD-SUC 替换为普通蔗糖颗粒(经过研磨,保持与 RD-SUC 结构化颗粒同等粒径)。下简称对照组夹心酱。最后将制备完成的草莓奶香风味夹心酱装至密封容器,放入冰箱冷藏保存。

1.3.7 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂草莓奶香风味夹心饼干的制备

将实验组夹心酱按照螺旋方式从饼干表面均匀涂抹,每片饼干的夹心酱用量为 1.5 g,随后盖压上层饼干至酱体延展距边缘约 0.3 cm 处。对照夹心饼干以对照组夹心酱代替实验组夹心酱,制备方法相同。最后放入冰箱冷冻 10 min,再转入冰箱冷藏层保存。

1.3.8 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂夹心酱应用于夹心饼干的感官评价

1.3.8.1 品评对象

感官评价选取了 10 名学生组成品评小组,其中男性 4 名,女性 6 名,年龄在 22 至 29 岁之间,均通过基础味觉测试(ISO 3972: 2011),能区分甜、咸、酸、苦四种味觉。对于品评员进行预实验训练,明确感官属性定义和量化标准。在测试前,要求品评员保持口腔清洁,无异味,且在测试前 1 小时内不得进食或饮用可能影响味觉的物品。

1.3.8.2 测试样品

含水量差异导致结构化油脂呈现出不同的流变性质,因此选取 SLs0、SLs75、SLs150、SLs750 四组具有差异化的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂,以相应的夹心酱填充夹心饼干作为实验组,在重点评价减糖效果的同时,探究结构化油脂的触变性差异对口感的影响。对照组为 SUC/SFO 结构化油脂夹心酱填充的夹心饼干。所有样品经三位数随机编码后,样本置于白色编码塑料盘中,随机位置顺序摆放,由品评员独立评估。

1.3.8.3 测试方法与流程

采用定量描述分析(Quantitative Descriptive Analysis, QDA)对比含有对照组夹心酱的夹心饼干(对照组)与含有实验组夹心酱的夹心饼干(实验组)的感官特性差异,重点关注甜度及相关属性。夹心饼干的感官评价标准(0~10 分,以 6 分为对照)如表 1 所示。

其中,对照组的各项感官评价属性定义为 6 分。每评价完一个样品,用清水漱口,等待 1 min 再测试下一样品。

表 1 夹心饼干的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standards of sandwich biscuits

分数	甜度	口感	质构	黏合性
0	完全不甜	极粗糙，难以下咽	极松散或极硬，无法咀嚼	几乎无黏合，一掰即散
3	甜味较淡	较粗糙，有明显颗粒感	较松散或较硬	黏合较弱，容易分离
6	甜度适中（对照水平）	口感适中（对照水平）	质构适中（对照水平）	黏合性适中（对照水平）
8	很甜	较顺滑，细腻	较紧密，软硬适宜	黏合较强，结合紧密
10	极甜	非常顺滑，非常细腻	非常紧密，软硬完美	黏合极强，结合非常紧密

1.3.8.4 感官数据处理与分析

每组样本的每项指标取 10 人的平均分。

1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2018 和 Origin 2021 对数据进行整理、统计、绘图及显著性分析，数据以“平均值±标准差”的形式表示。

2 结果与讨论

2.1 不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的外观照片

如图 3 的外观照片，不同的水含量对 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的结构强度具有明显影响。在倒置状态下，除 SLs75 样品外，其他样品均无法维持自身结构。SLs75 样品的结构强度最强，随着水含量的进一步增加，结构化油脂的强度又逐渐下降。因此可以推断，含水量对于结构化油脂的结构强度影响存在一个拐点。适量的水分（0.75‰）加入，能够提升结构化油脂的结构强度，但过量的水分（如 6.00‰、7.50‰）会弱化结构化油脂的结构强度。其次，从颜色角度来看，不同含水量的结构化油脂样品颜色无明显变化，表明含水量对于结构化油脂的颜色无明显影响。

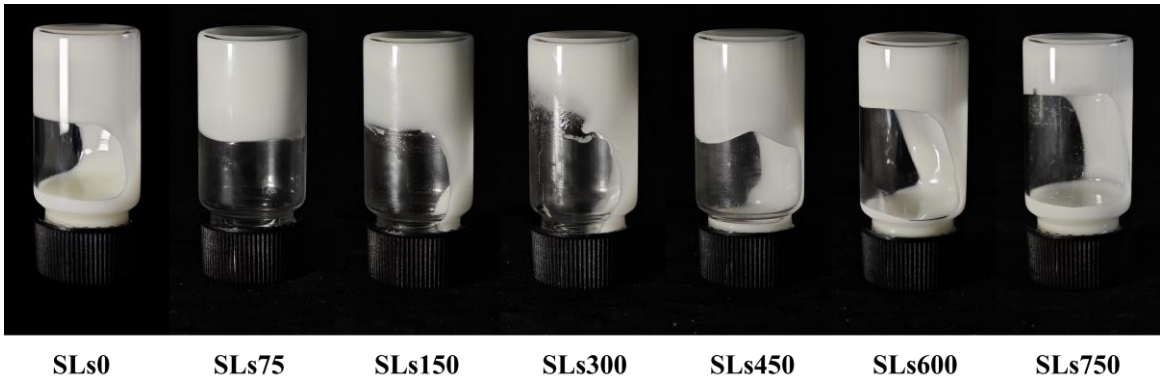


图 3 不同含水量的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂外观照片

Fig.3 Appearance photos of RD-SUC/W/SFO structured lipids with different water contents

2.2 不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的油结合力

如图 4 所示，随着水含量从 0.00‰增加到 7.50‰，7 个结构化油脂样品的持油率分别为 78.64%、83.11%、76.08%、72.18%、67.43%、64.68%和 60.18%。呈先增加后下降的趋势。这可能归因于少量水在颗粒之间形成液桥，从而产生毛细管力并促进颗粒间的连接，进而构建网络结构，对油脂产生束缚作用。该机制与毛细悬浮体系中典型的悬索态行为一致。当水含量提高时，颗粒网络结构转化为毛细管聚集体，整体强度下降，对油脂的束缚作用也会随之下降。

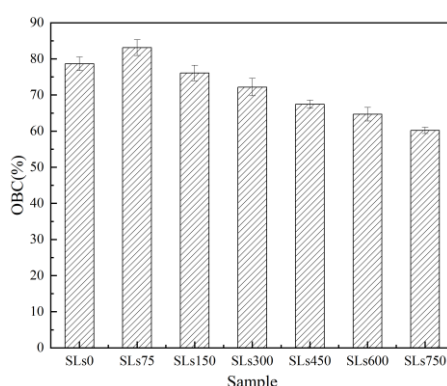


图4 不同含水量的RD-SUC/W/SFO结构化油脂持油率

Fig.4 Oil-binding capacity (OBC) of RD-SUC/W/SFO structured lipids with different water contents

2.3 不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的流变学性质分析

对样品进行黏度、应变、频率扫描及触变测试,可更清晰地对其流变学性质进行定性定量分析。如图 5a 所示,从剪切速率-黏度曲线可以看出,在不同剪切速率下,各样品表观黏度发生变化,表现出剪切稀化特性。SLs75 样品黏度最大,随后是 SLs150、SLs300 样品,SLs450 样品黏度与 SLs0 样品几乎相同。SLs600 和 SLs750 样品黏度进一步降低。

如图 5c 所示,适量水分的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂,储存模量 (G') 和损耗模量 (G'') 显著增加,从偏流动性的弱凝胶态转变为偏固态的凝胶态。其中,SLs75 样品表现出峰值储能模量。当含水量超过 SLs75 样品时,储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 逐渐降低。当含水量大于 SLs450 样品后,储能模量 (G') 在中高频率区间小于损耗模量 (G''),展现出明显的频率依赖性,结构化油脂系统崩溃,转变为液态。应变扫描测试结果进一步支持这一特性。如图 5b 所示,在线性黏弹性区域 (LVR) 内,所有结构化油脂的 G' 值都大于 G'' 值,表明弹性行为在非破坏性条件下占主导地位。含水量影响线性黏弹性区 (LVR) 宽度范围。通常,较宽的线性黏弹性区意味着结构化油脂在较大应变范围内仍能保持结构稳定,具有更好的稳定性。随着应变的增加, G' 和 G'' 均逐渐下降,说明在大应变下,体系的结构受到破坏,弹性储能和黏性耗散能力均减弱。其中,SLs75 样品具有最佳的结构稳定性,而过量的水导致结构稳定性下降。

屈服应力根据这些测量值计算得出,如图 5d 所示,反映了结构化油脂从弹性状态转变为流动状态所需的最小应力。从图中可以看出,屈服应力随含水量的增加呈现先增加后减少的趋势。其中,SLs75 样品的屈服应力达到最大值 21.65 Pa。这表明适量的水添加可以增强体系中颗粒间的相互作用,提高体系的屈服应力,但当含水量超过一定范围后,过多的水可能导致颗粒间的相互作用减弱,从而使屈服应力下降^[20,21]。

触变性是指材料在受到剪切力时,其黏度或结构发生可逆变化的特性,具体表现为“一触即变”的流变行为^[22]。触变性材料在剪切力作用下,黏度可能降低(剪切变稀)或升高(剪切增稠),而停止剪切后,黏度会逐渐恢复原状。通过三段式的触变测试 (Three Interval Thixotropy Test, 3ITT),能够评估 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂在实际加工过程经历的静置、剪切、恢复过程,从而模拟材料在实际应用中的受力变化。触变测试评估了不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的触变恢复行为。如图 5e 所示,在低剪切阶段 (0~600 s, 0.1 s^{-1}),初始黏度 (η_i) 反映了由 RD-SUC 结构化颗粒与 SFO 形成的初始网络结构。在这一阶段,所有样品的初始黏度均有不同程度的降低。随着含水量的增加,RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的初始黏度先升高,在含水量为 0.75% 时达到顶峰,而后降低。随后的高剪切阶段 (600~700 s, 10 s^{-1}) 模拟了加工过程中的剪切作用,在高频剪切力作用下,结构化油脂的网络结构被破坏,导致黏度迅速降低。这一阶段,不同含水量样品的黏度变化趋势与低剪切阶段相似。最后的低剪切阶段 (0~600 s, 0.1 s^{-1}) 评估了结构化油脂停止剪切后结构的恢复程度,反映结构化油脂的自修复能力。由于不同含水量导致的网络结构作用力差异,在高剪切力作用后,样品呈现出不同程度的黏度恢复。

如图 5f 所示,不同样品的触变恢复率呈现差异。SLs0 样品表现出最低的恢复率,仅为 43.46%,这可能是由于高剪切导致 RD-SUC 颗粒与 SFO 形成的网络发生不可逆破坏。对于 SLs75 样品,其体系中引入的水分可能在 RD-SUC 颗粒之间形成液桥结构,从而增强颗粒间的相互作用并提高网络稳定性,使其对剪切作用的抵抗能力显

著增强。在高频剪切结束后,网络结构能够较好地维持并恢复,触变恢复率提升至 92.58%,接近完全恢复。当含水量继续增加,样品的触变恢复率逐渐降低,分别为 76.58% (SLs150)、74.94% (SLs300)、72.42% (SLs450)、64.73% (SLs600) 和 62.56% (SLs750)。尽管如此,所有含水样品的触变恢复率仍高于无水体系。这可能归因于水分在颗粒间形成的液桥结构,该结构在剪切破坏后能够重新建立颗粒连接,从而促进网络结构的恢复,提高体系的触变恢复能力^[23]。

综上所述,含水量是影响 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂体系流变特性的重要因素。这些结果与结构化油脂样品直观的照片和油结合力的结果相符。因此,可以得出结论,适量的水(0.75%)可以增强颗粒间的毛细管力,促进颗粒聚集成网络结构,从而提高体系的弹性模量、屈服应力等机械性能,这表明体系中颗粒间相互作用增强,与毛细管力诱导的颗粒网络形成机制相一致^[11,13]。然而,过多的水可能破坏这种网络结构,导致流变性能下降。SLs75 样品具有最高的触变恢复率,表明其剪切后能快速重建结构,在实际食品应用中具有加工性能和口感上的优势。例如,在灌装或喷涂时,酱料受剪切力作用变稀,便于高速填充,停止剪切后快速增稠,形状保持;在口腔中受剪切作用变稀,有利于释放风味^[24]。

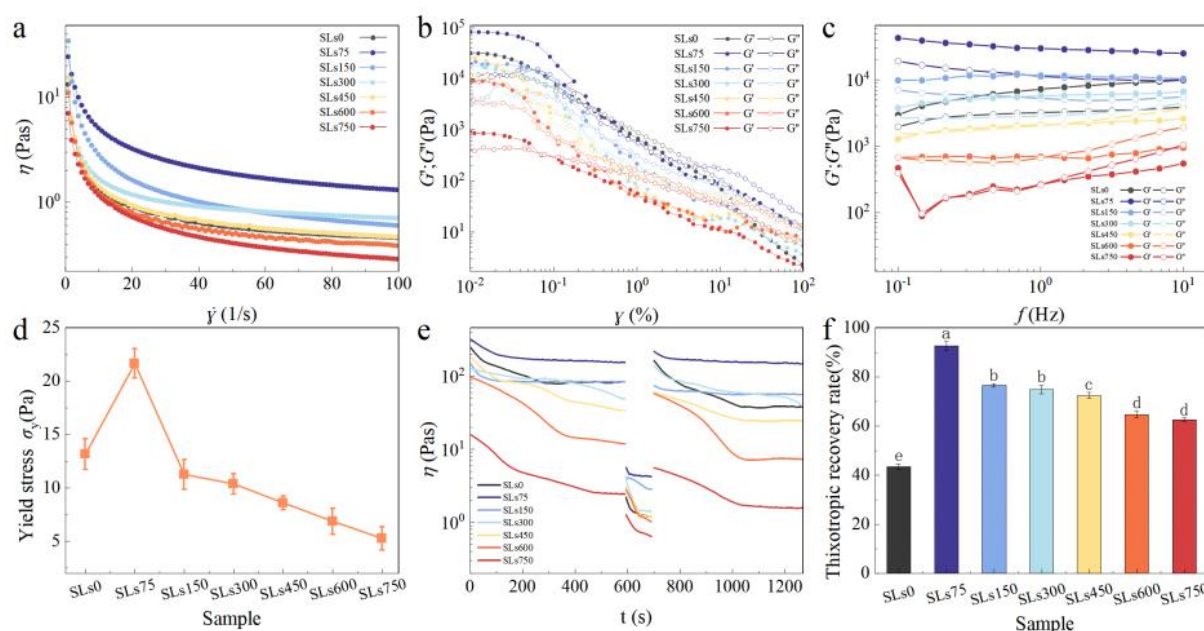


图 5 不同含水量的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的流变学性质分析

Fig.5 Rheological properties of RD-SUC/W/SFO structured lipids with different water contents

注: a 为黏度扫描, b 为应变扫描, c 为频率扫描, d 为屈服应力, e 为触变测试, f 为触变恢复率。图中同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的微观结构

不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的微观结构如图 6 所示,随着含水量的增加, RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的中 RD-SUC 结构化颗粒的粒径逐渐增大。该现象可能与少量水引起的毛细管力作用有关,使颗粒间产生桥联并发生团聚。油相占比随含水量增加呈现先减小后增大的趋势。SLs75 样品的网络中油相面积占比最小,呈现出更均匀、紧密的网络结构。RD-SUC 颗粒不再均匀分散在油相中,而是在油相内部发生微相分离,形成类似毛细悬浮体系中报道的颗粒聚集结构,蔗糖从均匀分布向不均匀分布转化,实现了糖的不均一分布。含水量大于 SLs75 样品后, RD-SUC 颗粒过度聚集,提供的 SFO 接触表面积减小,束缚能力减弱^[25]。这种变化与油结合力及流变学测试结果相符。虽然该结构化油脂在宏观上呈现类似水包油型凝胶的外观,但其聚焦显微结果表明油相为连续相,说明其并非传统乳液体系。在本研究中,水以微量形式存在,并未形成稳定液滴,而是在颗粒间形成液桥结构,构建三维网络。因此,该体系本质上属于油连续的毛细悬浮体系,而非水包油乳液。

图 7a 为不同含水量 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的光学显微图像。随着含水量的增加,蔗糖晶体逐渐聚集,且蔗糖晶体颗粒的聚集体粒径逐渐增大。这是因为水分可能在颗粒间形成液桥结构,从而促进颗粒之间的连接。

SLs75 样品中油相网络呈现最均匀、紧密的三维网络结构。当含水量大于 SLs300 样品，颗粒的毛细管聚集效应更加明显，呈现更大尺度成块成片的结构。图 7b 为对应样品相同位置的偏光显微图像。偏光显微图像从蔗糖晶体的视角提供了 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂微观结构信息。从图中可以发现，单独的蔗糖晶体颗粒明亮，但随着含水量增加，蔗糖晶体发生毛细管聚集，蔗糖聚集颗粒在偏光显微镜图像中变暗，这可能是蔗糖晶体颗粒聚集导致各向异性随机分布，同时表面形成了凹凸不平的界面，减弱了光线，形成暗区。随着含水量增加，聚集的蔗糖晶体所在的暗区逐渐增多。

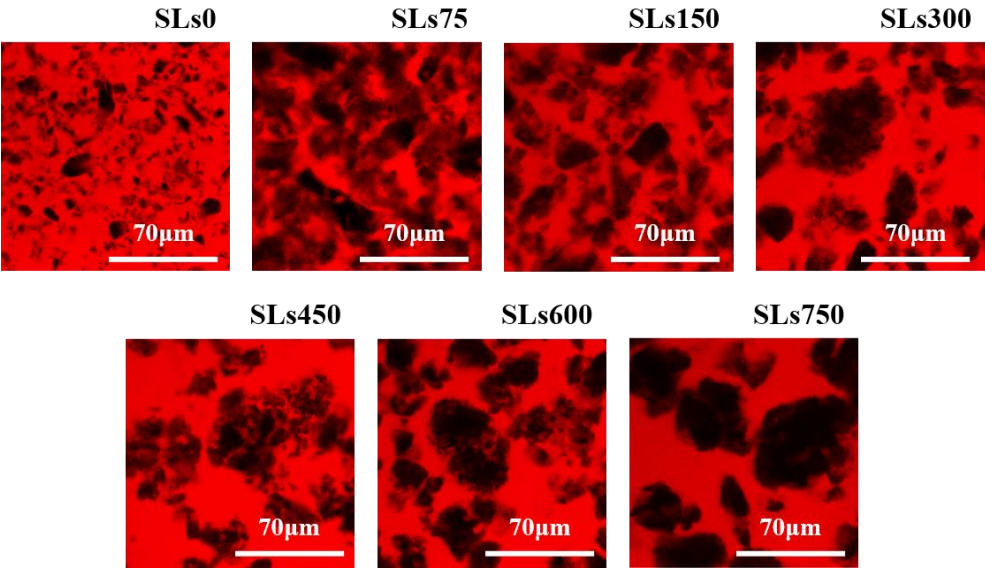


图 6 不同含水量的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂激光共聚焦图像

Fig.6 CLSM images of RD-SUC/W/SFO structured lipids with different water contents

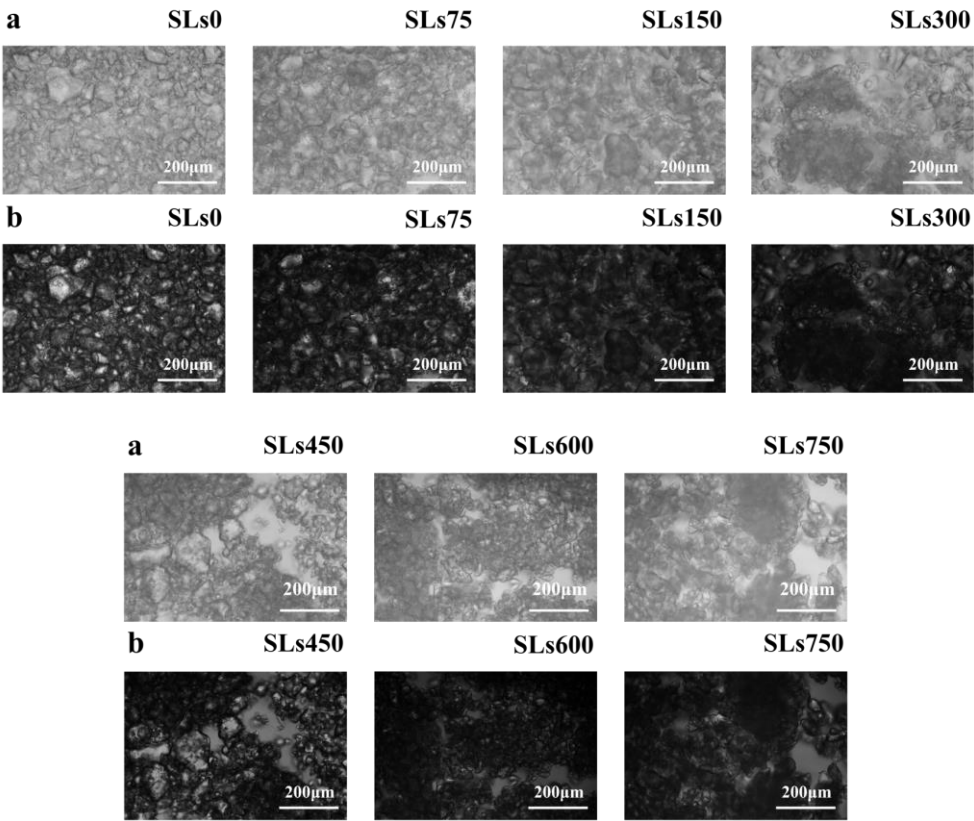


图 7 不同含水量的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂的微观结构

Fig.7 Microstructure of RD-SUC/W/SFO structured lipids with different water contents

注：a 为光学显微图像，b 为偏光显微图像。

上述结果表明，RD-SUC 结构化颗粒在 SFO 中的分散体黏度在少量水添加时显著增加。这是由于水添加引起的液体桥接，使 RD-SUC 结构化颗粒相互作用增加，从而导致黏度增大。根据 Koos 等^[11]关于毛细悬浮体系的研究，在低含量条件下，次级流体能够润湿颗粒但不足以完全溶解或分散颗粒，从而在颗粒之间形成毛细桥，诱导颗粒聚集并构建网络结构。这不仅强化了网络结构，还增强了结构化油脂的弹性，使其从黏性或弱弹性行为转变为高弹性或凝胶状行为。本研究中观察到的结构变化与该机制相一致。进一步结合显微结构观察与流变学结果，可以推测在低含水量条件下，水分在颗粒间形成液桥，并由于界面曲率产生毛细压力，从而增强颗粒间吸引作用，促进颗粒聚集和网络结构构建，该行为与典型毛细悬浮体系的特征一致。相比之下，氢键或空间位阻等作用虽可能存在，但在该体系中并非主导因素。

2.5 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂夹心酱应用于夹心饼干的感官评价

以 SLs0、SLs75、SLs150 和 SLs750 四组具有流变性质差异的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂制备的夹心酱为实验组，分别用于填充夹心饼干，重点评价其减糖效果，并探究结构化油脂的触变性差异对口感的影响。同时，以 SUC/SFO 结构化油脂夹心酱填充的夹心饼干作为对照组，且对照组所有感官指标定义为 6 分，进行感官评价。结果如表 2 所示。

表 2 夹心饼干的感官评价结果
Table 2 Sensory evaluation results of sandwich biscuits

样品	甜度	口感	质构	黏合性
对照	6.00	6.00	6.00	6.00
SLs0	6.02±1.16 ^b	6.30±1.12 ^a	6.35±0.98 ^a	6.88±0.83 ^b
SLs75	7.86±1.37 ^a	5.24±1.18 ^{ab}	5.43±1.24 ^a	7.92±0.61 ^a
SLs150	6.39±0.96 ^b	5.15±1.40 ^b	6.18±1.35 ^a	6.05±0.85 ^c
SLs750	5.74±1.21 ^b	3.85±0.98 ^c	3.87±1.26 ^b	4.75±1.03 ^d

注：表中同列小写字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

随着 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂含水量增加，所制备的夹心饼干甜度呈现不同的变化。SLs0 组夹心饼干的甜度为 6.02 分，与对照组几乎没有差异；SLs75 组夹心饼干的甜度显著增加（ $P<0.05$ ），甜度感官评分达到了 7.86 分。然而，随着含水量继续增加，相应夹心饼干的甜度又逐渐降低。一般而言，高黏度体系会因降低溶质扩散速率而抑制甜味分子的释放，从而减弱甜味感知。然而，本研究中 SLs75 样品却观察到“黏度升高，甜味增强”的相反趋势，这可能与夹心酱原料结构化油脂的触变性质有关：在静态条件下，三维网络结构限制了 RD-SUC 颗粒的暴露与溶解；而在口腔咀嚼剪切作用下，网络结构被破坏，体系迅速由高黏度转变为低黏度流动状态，从而促进颗粒暴露与溶解，加速甜味分子的释放。尤其 SLs75 样品具有最优网络结构和最高触变恢复能力（92.58%），在剪切过程中表现出更显著的“结构破坏—释放”行为，因此产生更强的瞬时甜味感知，这说明口腔加工过程的结构破坏对风味释放具有重要影响^[26]。而 SLs0、SLs150、SLs750 样品的触变恢复率分别为 43.46%、76.58%和 62.56%。在经过加工过程后，液态油 SFO 从被破坏的网络结构中较多地析出，其网络结构无法恢复到初始状态。在口腔咀嚼的剪切作用下，结构化油脂的网络结构被破坏，此时，在加工后已析出的液态油相，一定程度上阻隔了 RD-SUC 结构化颗粒的溶解和与口腔甜味受体的接触，从而影响了甜味的感知^[27]。此外，高含水量结构化油脂中，RD-SUC 颗粒聚集成较大粒径，从而减少了颗粒整体的表面积，可能也会影响甜味^[28,29]。

质构和口感是食品在咀嚼过程中由其机械性质、流变特性和表面性质所引起的感官表现，包括顺滑感、黏附感（黏牙感）和粗糙感等属性^[30]。随着含水量增加，口感评分逐渐降低。根据品评员的反馈，夹心酱的细腻顺滑程度下降，粗糙感增加。这是由于水分增加导致的颗粒聚集，聚集颗粒的粒径增大导致了夹心酱颗粒感增加。其中，SLs750 组夹心饼干的口感评分仅为 3.85 分，夹心酱的粗糙感十分严重，这与微观结构结果相符。质构反映的是夹心酱软硬、紧密或疏松程度，与口感评分的趋势类似，随着含水量增加，质构评分逐渐降低。根据品评员的反馈，夹心酱变得更加疏松而不紧密，从图 8 所展现的夹心层状态可以看出，随着含水量增加，夹心酱的光滑程度下降，逐渐变得粗糙松散。黏合性是夹心酱是否能与饼干片紧密结合的指标。随着含水量的增加，对应黏合

性评分先升高后降低, SLs75 组的黏合性评分达到最高, 为 7.92 分, 这与结构化油脂的黏度扫描结果一致。表明适当水分含量结构化油脂制备的夹心酱, 能够与饼干片结合紧密。



图 8 完整夹心饼干及夹心层照片

Fig.8 Photographs of Intact Sandwich Biscuits and Filling Layers

感官评价结果表明, SLs75 组夹心饼干的甜度高于对照组, 黏合性较好, 而在口和质构方面与对照组无显著差距 ($P>0.05$)。SLs75 样品对应的蔗糖含量为对照组 SUC/SFO 结构化油脂的 80%, 但甜度显著增加。因此, 将 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂夹心酱应用于夹心饼干, 可实现蔗糖用量降低超过 20%。后续研究将进一步结合油脂风味 (如油香、异味等) 进行系统分析, 以更全面评估该结构化油脂的应用潜力。此外需要指出的是, 本研究中结构化油脂的引入并未增加体系中的脂肪含量, 而是通过构建三维网络结构调控脂相分布与甜味释放行为, 从而在不改变脂肪水平的前提下实现减糖效果。已有研究表明, 结构化油脂 (如油凝胶) 可作为传统固体脂肪的替代体系, 在维持产品质构的同时改善脂肪组成甚至降低脂肪摄入^[31,32]。因此, 本研究所构建的结构化油脂体系不仅在减糖方面具有应用潜力, 同时在脂肪结构优化及健康化方向亦具有拓展价值。

3 结论

本研究构建了 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂体系, 系统探讨了基于毛细管作用的水分调控对其网络结构与流变特性的影响, 并将其应用于夹心饼干风味夹心酱的减糖评价。结果表明, 随着含水量增加, 体系微结构由毛细管悬索状向毛细管聚集体转变。推测 SLs75 样品颗粒间通过毛细管力作用形成液桥连接, 从而构建稳定的网络结构, 显著增强体系的网络强度, 使油结合力提高至 83.11%, 屈服应力达 21.65 Pa, 结构稳定性最佳, 且触变恢复率达到 92.58%, 表现出优异的结构重构能力和抗剪切性能, 表明其在实际加工过程中具有良好的稳定性与应用潜力。进一步将其应用于风味夹心酱中, 感官评价结果显示, SLs75 组样品凭借良好的触变特性促进 RD-SUC 结构化颗粒的甜味释放, 甜度感知显著高于对照组, 同时在口感与质构指标方面无显著差异 ($P>0.05$), 实现蔗糖用量降低超过 20%。综上所述, 基于毛细管作用调控构建的 RD-SUC/W/SFO 结构化油脂体系在保证产品质构与感官品质稳定的前提下, 实现了显著减糖效果, 为减糖型制品的开发提供了新的技术路径与理论依据。

参考文献

- [1] HUANG Y, CHEN Z, CHEN B, et al. Dietary sugar consumption and health: umbrella review [J]. *Bmj*, 2023, 381: e072691.
- [2] JULIE E G, DENALI B, MAIA M J. Perspectives on recent reviews of aspartame cancer epidemiology [J]. *Global Epidemiology*, 2023, 6: 100117.

- [3] MAHSHAD D, YASAMIN D, REYHANE A, et al. Effect of substitution of sugar with xylitol and maltitol on characteristics and quality of cakes: A systematic review and meta-analysis [J]. *Cereal Chemistry*, 2023, 100: 256-267.
- [4] THI P, ELIZABETH G K, DU X F. Sugar Reduction: Product Challenges, Approaches, and Application of Flavors[M]//Flavor-Associated Applications in Health and Wellness Food Products. Cham: Springer International Publishing, 2024: 137-161.
- [5] ZHAO X Y, ZHAO L L, BING C. Strategies and mechanisms of sweetness enhancement in food [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2025, 60(2): vvaf207.
- [6] CHAO L, LI Y X, QING S, et al. Taste and its receptors in human physiology: A comprehensive look [J]. *Food Frontiers*, 2024, 5(4): 1512-1533.
- [7] NATHALIE M D, LAURE B B, AUDREY M N, et al. The gut microbiome and dietary fibres: implications in obesity, cardiometabolic diseases and cancer [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2025, 23(4): 225-238.
- [8] 孔凡,郭健,杨晓泉.一种膳食纤维-蔗糖共结晶复合颗粒及其制备方法和应用: 202410800311. X[P]. 2024-09-13.
- [9] 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, 15: 043.
- [10] FRANCESCA R L, VALERIA G, NOEMI B, et al. The effects of intermolecular interactions on the physical properties of organogels in edible oils [J]. *Journal of colloid and interface science*, 2016, 483: 154-164.
- [11] ERIN K, NORBERT W. Capillary forces in suspension rheology [J]. *Science*, 2011, 331(6019): 897-900.
- [12] HAN C W, WANG G S, YIN S W, et al. Formation of small-granule starch oleogels based on capillary force: Impact of starch surface lipids on lubrication performance [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 334: 122022.
- [13] ERIN K. Capillary suspensions: Particle networks formed through the capillary force [J]. *Current opinion in colloid & interface science*, 2014, 19(6): 575-584.
- [14] 王高尚.基于毛细悬浮体系构建蛋白质基油凝胶的研究[D].广州:华南理工大学, 2022.
- [15] LE Q Y, FANG Z, CHEN H Y, et al. Comprehensive review on oleogels structured by lipid-based compounds: from structure mechanisms to nutritional functionalities and applications in food industry [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, 24(4): e70214.
- [16] LIU L Y, GAO Z L, CHEN G, et al. A comprehensive review: Impact of oleogel application on food texture and sensory properties [J]. *Food Science & Nutrition*, 2024, 12(6): 3849-3862.
- [17] KAPIL R, NARAYANSING C, NIRALI N S, et al. Encapsulation of ginger oleoresin in co-crystallized sucrose: development, characterization and storage stability [J]. *Food and Function*, 2021, 12(17): 7964-7974.
- [18] SARA D P, SONIA C, EDMUND C, et al. Shear nanostructuring of monoglyceride organogels [J]. *Food Biophysics*, 2010, 5(3): 211-217.
- [19] YUE Y, HE Y T, WANG Y F, et al. Fabrication and characterization of oleogels stabilized by pea protein-curdan microgels [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 308: 142200.
- [20] ANNACHIARA P, ANNACHIARA P, FRANCESCO D. Oil structuring through capillary suspensions prepared with wheat middlings micronized directly in oil by high-pressure homogenization [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109152.
- [21] VINCENZO C, DENIZ Z G, ISABEL F F. Rheological control of pea fibre dispersions in oil: The role of particle and water volume fractions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 121: 106988.
- [22] JAN M, NORMAN J W. Thixotropy [J]. *Advances in colloid and interface science*, 2009, 147: 214-227.
- [23] ANNIKA F, GERARD G R, JASPER L, et al. The rheological behavior of oil-continuous capillary suspensions prepared with water-absorbing protein particles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2025: 111782.
- [24] FABRICE N, DERYA A, ATEFEH A R, et al. Food formulation: rheological and tribological determinants of oral processing and flavor perception [J]. *Food Research International*, 2026, 228: 118377.
- [25] WANG G S, ZHANG L Y, FENG G X, et al. Structure-rheological relationship of capillary protein oleogels: The role of particle wettability [J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 159: 110657.
- [26] CHEN J S. Food oral processing: Mechanisms and implications of food oral destruction [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 45(2): 222-228.
- [27] LI S Q, YAN J, YANG J H, et al. Modulating peppermint oil flavor release properties of emulsion-filled protein gels: Impact of cross-linking method and matrix composition [J]. *Food Research International*, 2024, 185: 114277.

-
- [28] MEGAN H, BRENT S M, ANWESHA S, et al. Dispersion behaviour of insoluble particles with different surface properties in non-aqueous media-biopolymer based oleogels [J]. *Soft Matter*, 2025, 21(38): 7460-7475.
- [29] ELLE M, SOO Y L. Sugar reduction methods and their application in confections: a review [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2022, 31(4): 387-398.
- [30] MALCOLM B. Food texture and viscosity: concept and measurement [M]. Elsevier, 2002.
- [31] MD J F, BISHAL B, NIAZ M, et al. Oleogels as a promising alternative to animal fat in saturated fat-reduced meat products: A review [J]. *Gels*, 2024, 10(2): 92.
- [32] ROMAN S, YULIYA F, VARUZHAN S, et al. Waxy oleogels for partial substitution of solid fat in margarines [J]. *Gels*, 2023, 9(9): 683.