

# 大豆分离蛋白/微晶纤维素油凝胶 消化特性及抗氧化特性研究

袁 缘<sup>1,2,3</sup>, 王冀妍<sup>1,2,3</sup>, 胡 坦<sup>1,2,3</sup>, 苏洪辰<sup>1,2,3</sup>,  
谢雨欣<sup>1,2,3</sup>, 程 溪<sup>1,2,3</sup>, 胡 昊<sup>1,2,3</sup>

(华中农业大学食品科技学院<sup>1</sup>, 武汉 430070)

(环境食品学教育部重点实验室(华中农业大学)<sup>2</sup>, 武汉 430070)

(果蔬加工与品质调控湖北省重点实验室(华中农业大学)<sup>3</sup>, 武汉 430070)

**摘 要:**本研究采用油结构化技术制备了大豆分离蛋白/微晶纤维素(SPI/MCC)复合油凝胶,以葵花籽油(SO)和亚麻籽油(LO)为油相,探究了 MCC 添加质量分数(0%~30%)的影响。结果表明:适当的 MCC 添加量可以增加油凝胶的整体硬度。消化过程中,随 MCC 比例增加,油凝胶在胃肠阶段的聚集程度增强,游离脂肪酸(FFA)释放率降低,但不改变最终 FFA 组成;SO 油凝胶的脂质消化程度高于 LO 油凝胶,后者消化产物中亚麻酸质量分数达 87%,前者主要为油酸(质量分数 30%)和亚油酸(质量分数 60%);氧化稳定性分析显示,SO 油凝胶优于 LO 油凝胶,且当 MCC 添加质量分数为 20%时(SOM20/LOM20),过氧化值(PV)和硫代巴比妥酸值(TBA)最低。MCC 的加入可有效改善油凝胶的质构特性以及氧化稳定性并调控脂质消化行为,同时油相类型显著影响其消化特性与氧化稳定性。

**关键词:**油凝胶;大豆分离蛋白(SPI);微晶纤维素(MCC);消化;抗氧化

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001286

中图分类号:TS202.3 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0070-11

网络首发时间:2025-12-04 10:12:49

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251203.1902.002

## Investigation on the digestive and antioxidant characteristics of soy protein isolate/microcrystalline cellulose-based oleogels

Yuan Yuan<sup>1,2,3</sup>, Wang Jiyang<sup>1,2,3</sup>, Hu Tan<sup>1,2,3</sup>, Su Hongchen<sup>1,2,3</sup>,

Xie Yuxin<sup>1,2,3</sup>, Cheng Xi<sup>1,2,3</sup>, Hu Hao<sup>1,2,3</sup>

(Huazhong Agricultural University<sup>1</sup>, Wuhan 430070)

(Key laboratory of Environment Correlative Dietology (Huazhong Agricultural University),

Ministry of Education<sup>2</sup>, Wuhan 430070)

(Hubei Key Laboratory of Fruit & Vegetable Processing & Quality Control

(Huazhong Agricultural University)<sup>3</sup>, Wuhan 430070)

**Abstract:** In this study, soybean isolate protein/microcrystalline cellulose (SPI/MCC) composite oleogels were prepared by oil structuring technique. Taking sunflower oil (SO) and linseed oil (LO) as oil phases, the effect of MCC addition ratio (0%–30%) was investigated. The findings indicated that the appropriate addition of MCC at optimal levels could increase the overall hardness of oleogels. During the process of digestion, with the increase of

基金项目:国家重点基础研究发展计划子课题项目(2024YFF1106505-02),华中农业大学“启源探微计划”培育项目(2662025SPPY001)

收稿日期:2025-06-24

第一作者:袁缘,女,2000年出生,学士,食品科学,yuancol@126.com

通信作者:胡昊,男,1987年出生,博士,食品科学,huhao@mail.hzau.edu.cn

MCC ratio, the aggregation degree of oleogels in the gastrointestinal stage was enhanced, and the rate of free fatty acid (FFA) release rate was reduced, but the final FFA composition was not changed. In addition, the degree of lipid digestion of SO oleogels was found to be higher than that of LO oleogels. Furthermore, the proportion of linolenic acid in the digestion products of the latter was found to reach up to 87%, whereas the former primarily consisted of oleic acid (30%) and linoleic acid (60%). Oxidative stability analysis indicated that SO oleogels were superior to LO oleogels, and when the MCC addition amount was 20% (SOM20/LOM20), the peroxide value (PV) and thiobarbituric acid value (TBA) were the lowest. This study confirmed that the addition of MCC could effectively improve the texture properties and oxidative stability of oleogels and regulate lipid digestion behavior, and the type of oil phase has been shown to have a significant impact on both the digestive characteristics and oxidative stability of the oleogels.

**Key words:** oleogel; soy protein isolate (SPI); microcrystalline cellulose (MCC); digestion; antioxidant activity

高脂饮食会导致肥胖、冠状动脉心脏病、糖尿病及部分癌症等疾病的患病风险增加<sup>[1]</sup>。为应对这些慢性疾病,降低食品中总脂肪含量成为有效策略<sup>[2]</sup>,其中低脂食品以及脂肪替代物的开发成为研究热点。此外,开发用于调控胃肠道内脂肪消化的产品也被视为改善食品营养结构的有效方法<sup>[3]</sup>。

油结构化技术是指将食用液体油转化为具有一定黏弹性的油凝胶的方法<sup>[4]</sup>。研究表明,以基于蛋白质/多糖材料为模板的油凝胶可以通过间接模板法制备<sup>[5]</sup>,制备而成的油凝胶可用于替代食品中的不健康饱和脂肪和反式脂肪<sup>[6]</sup>,因此引发了食品领域的广泛关注。采用间接模板法制备油凝胶主要通过提前形成3种不同的模板实现:乳液模板法,将液态油乳化后移除水分形成聚合物网络,然后通过剪切作用促进油凝胶的形成;乳液凝胶模板法,通过乳液的连续相或分散相形成三维网络,从而促进凝胶形成<sup>[7]</sup>;气凝胶模板法,采用多孔结构的聚合物网络对液体油进行物理吸附<sup>[6]</sup>。

气凝胶因其独特的结构特征(高比表面积、高孔隙率、低密度)和功能特性(低成本、可生物降解性、优异的脂质包埋能力以及油脂吸附能力),在食品工业中展现出作为脂肪替代品的巨大潜力<sup>[8,9]</sup>。研究显示,基于多糖和蛋白质的气凝胶材料在油脂吸附方面表现出显著优势。Li等<sup>[10]</sup>通过冻干海藻酸盐和明胶形成美拉德反应偶联物从而获得气凝胶模板,并将其浸泡在山茶油中制备出吸油量达到23.31 g/g,持油量达到84.75%的油凝胶,且该凝胶表现出良好的体外消化性能。Plazzotta等<sup>[11]</sup>制备了超临界二氧化碳干燥或冷冻干燥乳清分离蛋白油凝胶颗粒。冷冻干燥的气凝胶颗粒产生弱油凝胶,而超临界干燥气凝胶颗粒则产生可塑性(临界应力=723.2 Pa)油凝胶,具有与传统脂肪相当的流变特性。Shan

等<sup>[12]</sup>通过静电吸附和化学交联制备羧甲基纤维素钠(CMC-Na)/大豆分离蛋白(SPI)气凝胶模板油凝胶,得到吸油量在13.58~56.48 g/g之间且持油率高达80%的油凝胶。Laiane等<sup>[13]</sup>以纤维素和淀粉冷冻凝胶为模板制备油凝胶,并对其形态、热学、力学和黏弹性等性质进行表征,发现添加纤维素可以增强油凝胶的机械强度。

目前有研究表明,膳食纤维的摄入可以改变胃肠道内物质的理化特征,从而实现对胃肠道脂质消化的调节<sup>[14]</sup>,例如延迟或者减少脂质消化<sup>[15]</sup>,最终达到在增加饱腹感同时降低肥胖风险<sup>[16]</sup>。微晶纤维素作为膳食纤维的一种,具有比表面积大、机械强度高、可再生性和环境友好等众多优异性能。研究表明,微晶纤维素可有效调控脂质在胃肠道的消化行为<sup>[17]</sup>,是一种安全无毒的食品添加剂。微晶纤维素在食品中还可作为乳化剂、冷冻稳定剂、环保填料以及脂肪替代物使用,这是由其内部具有两亲性的纤维素晶体,晶体表面存在的游离羟基可作为亲水点,而结晶部分可以作为疏水边缘<sup>[18]</sup>。同时,纤维素晶体造成的空间阻碍降低了系统中的水分流动,从而保持冰晶的尺寸并使冰晶尺寸分布范围较窄<sup>[19]</sup>,同时还增强体系的机械强度。而其类似脂肪的口感以及肠道有益性促使其成为脂肪替代物的选择之一。此外,不同脂肪酸组成的油相会影响日常膳食,进而影响脂质的消化情况<sup>[20]</sup>。然而,目前关于纤维素添加比例和油脂种类对气凝胶基油凝胶消化特性及抗氧化性能的影响机制仍需系统研究。

本研究利用大豆蛋白-微晶纤维素复合气凝胶作为模板,采用葵花籽油和亚麻籽油制备了具有不同脂肪酸组成的大豆蛋白/微晶纤维素复合油凝胶,研究了不同微晶纤维素添加比例和油相类型下复合油凝胶理化特性、消化特性和氧化稳定性的差异,为

综合设计功能性低脂食品、制备新型脂肪代替物提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白(分析级,质量分数 90%)、谷氨酰胺转氨酶(分析级)、微晶纤维素(100~200 目,分析级)、葵花籽油(食品级)、亚麻籽油(食品级),其他所有试剂均为分析级。

### 1.2 仪器与设备

BL310 电子天平、AR2140 分析天平、LGJ-12A 冷冻干燥机、Ultra-Turrax T25 高速剪切机、UV-754N 紫外分光光度计、Avanti JXN-26 高速冷冻离心机、ZDJ-5B 自动电位滴定仪、Trace1310 ISQ 型气相色谱-质谱联用仪。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 油凝胶的制备

将大豆分离蛋白(SPI)和微晶纤维素(MCC)按照 100/0、95/5、90/10、85/15、80/20、70/30、60/40、50/50 质量比混合在去离子水中,在室温下持续搅拌 2 h。经过 4 ℃ 充分水合过夜后将混合物体系的 pH 值调至 7.0。随后将溶液置于 95 ℃ 水浴锅中加热 30 min,取出后冷却至室温。将一定量的谷氨酰胺转氨酶(TGase)溶液加入混合溶液中,快速搅拌 30 s,将混合物置于 45 ℃ 水浴锅中孵育 4 h。孵育结束后,将凝胶置于 95 ℃ 水浴锅中加热 1 min 灭酶。在所有体系中,固形物的最终质量浓度为 8 g/100 mL, TGase 的最终酶活为 20 U/g。将制备好的凝胶放在 4 ℃ 下固化过夜。所得凝胶从 10 mL 离心管中取出并切成厚度为 1 cm 的小块,在 -80 ℃ 下冷冻 24 h 后冻干并参照 Zhao 等<sup>[21]</sup>的方法制备油凝胶。对气凝胶样品进行准确称重,然后浸入葵花籽油(SO)或亚麻籽油(LO)中浸泡 6 h 内达到吸附-解吸平衡形成油凝胶。根据 MCC 添加的比例,将 SO 制备的油凝胶依次命名为 SOM0、SOM5、SOM10、SOM15、SOM20 和 SOM30;将 LO 制备的油凝胶依次命名为 LOM0、LOM5、LOM10、LOM15、LOM20 和 LOM30。

#### 1.3.2 油凝胶质构特性研究

参照 Zhao 等<sup>[21]</sup>报道的方法并稍作修改,使用质构分析仪对油凝胶样品进行压缩测试。测前、测中、测后的速度分别为 1 mm/s、0.1 mm/s、5 mm/s,触发力设为 10 g,直至达到 75% 的最大变形。硬度被定义为穿透样品所需的最大力(N)。

#### 1.3.3 油凝胶流变特性研究

使用配备有钢平行板(直径 = 40.0 mm,间隙 = 0.5 mm)的动态旋转流变仪测试油凝胶的流变特性。所有测试均在 25 ℃ 下进行,所有油凝胶经剪切后测定。为进行黏弹性评估,应用振荡应变扫描在 0.01%~100% 的范围内以确定油凝胶在 1 Hz 频率下的线性黏弹性区域(LVR)。LVR 表示为可以在不破坏样品结构的情况下进行测试的范围。在线性黏弹性区域内的应力值下,从 0.01~100 Hz 进行测定,并记录储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )的变化情况。

#### 1.3.4 油凝胶结构特性研究

参考 Cebi 等<sup>[22]</sup>的方法对油凝胶样品进行傅里叶变换衰减全反射红外光谱(ATR-FTIR)分析。所有测量均使用金刚石单反射 ATR 附件进行,分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数 64 次。光谱记录在  $4\ 000\sim 600\text{ cm}^{-1}$  光谱范围内。每次测量前收集空气光谱作为背景光谱,测试后使用乙醇溶剂对 ATR 晶体进行清洁。

#### 1.3.5 基于气凝胶模板的油凝胶消化特性的测定

##### 1.3.5.1 体外消化模型的建立

参照 INFOGEST 2.0 进行静态体外消化模拟<sup>[23]</sup>。模拟唾液(SSF)、模拟胃液(SGF)、模拟肠液(SIF)的组成和浓度如表 1 所示:

表 1 模拟消化液配比

组成	储备液 /mol/L	模拟唾液 SSF/mmol/L	模拟胃液 SGF/mmol/L	模拟肠液 SIF /mmol/L
氯化钾	0.50	15.10	6.90	6.80
磷酸二氢钾	0.50	3.70	0.90	0.80
氯化钠	2.00	13.60	72.20	123.40
氯化镁	0.15	0.15	0.12	0.33
碳酸铵	0.05	0.06	0.50	0.00
盐酸	6.00	1.10	15.60	8.40
氯化钙	0.30	1.50	0.15	0.60

注:为避免消化液产生沉淀,氯化钙应在正式消化时再加入。

油凝胶样品前处理:将含有 250 mg 油的油凝胶破碎后放入 150 mL 锥形瓶中,加入 4.75 g 磷酸缓冲液(5 mmol/L, pH 7.0)稀释样品<sup>[17]</sup>。

口腔阶段:将模拟唾液(SSF)于 37 ℃ 下预热。5 g 混合样品与 4 mL SSF 和 25  $\mu\text{L}$   $\text{CaCl}_2$  溶液混合,补充蒸馏水至总体积为 10 mL,将混合物在 37 ℃ 恒温振荡器中以 160 r/min 的转速下培养 2 min。

胃消化阶段:将模拟胃液(SGF)于 37 ℃ 下预热。将 8 mL SGF 添加到口腔阶段消化液中,加入 5  $\mu\text{L}$   $\text{CaCl}_2$  溶液,用 1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 值至

3.0。加入胃蛋白酶至消化液中,使最终消化混合物中酶活达到2 000 U/mL,补充蒸馏水至总体积为20 mL。将混合物在37 °C恒温振荡器中以110 r/min的转速下反应2 h,在沸水浴中3 min灭酶以终止胃消化。

小肠消化阶段:将模拟肠液(SIF)于37 °C下预热。将16 mL SIF添加到胃阶段消化液中,加入40  $\mu$ L CaCl<sub>2</sub>溶液,添加1 mol/L的NaOH溶液调节pH值至7.0。加入胆汁盐溶液使最终浓度达到10 mmol/L,将胰酶和胰脂肪酶添加到消化液中,使最终消化混合物中的酶活分别达到100 U/mL(胰酶),2 000 U/mL(胰脂肪酶)。在37 °C条件下反应2 h模拟肠消化。消化体系的pH值用pH-stat法自动滴定监测,通过滴加0.25 mol/L NaOH溶液保持pH值为7,在沸水浴中3 min灭酶以终止肠消化。

#### 1.3.5.2 消化产物微观结构的测定

共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)用于观测消化过程不同阶段的油凝胶微观结构。参照Winuprasith等<sup>[24]</sup>的方法进行测试,消化产物的油相用尼罗红染料(2 mg/mL乙醇)进行染色。使用CLSM和20 $\times$ 物镜在荧光模式下工作,获取显微照片。尼罗红的激发光谱和发射光谱分别为543 nm和605 nm。尼罗红染色油相时,单个油滴和富含脂质的区域显示为明亮的斑块,水相则在显微照片中显示为暗色。

#### 1.3.5.3 消化产物粒径的测定

参考Geng等<sup>[25]</sup>的方法对不同阶段消化产物的粒径进行表征。转速设置为2 000 r/min,折光率变化范围设置为0%~1%。分散相折射率为1.330,葵花籽油折射率为1.474,亚麻籽油折射率为1.490。

#### 1.3.5.4 游离脂肪酸释放率的测定

油凝胶的脂肪被脂肪酶等水解产生甘油和游离脂肪酸(FFA),FFA的释放会导致消化体系的pH值下降。参照Chen等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改,采用pH-stat法测定小肠消化过程中FFA释放率,使用恒定电位滴定仪不断向体系自动滴加0.25 mol/L的NaOH,使消化体系的pH值维持在7.0,每隔一定时间记录消化过程中NaOH的消耗量,总时间为120 min。通过消化过程中NaOH的消耗量计算出游离脂肪酸的释放量,从而反应油脂的消化速率和最终消化程度。对于油凝胶样品,使用相同质量的气凝胶样品进行空白测试。FFA( $y_1$ )释放率按式(1)计算(设每1个三酰甘油产生2个FFA):

$$y_1 = \frac{V_{\text{NaOH}} \times C_{\text{NaOH}} \times M_{\text{Lipid}}}{\omega_{\text{Lipid}} \times 2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $y_1$ 为FFA的释放率/%; $V_{\text{NaOH}}$ 为消化过程中用于中和FFA的NaOH溶液消耗的体积/L; $C_{\text{NaOH}}$ 为所用NaOH溶液的浓度(0.25 mol/L); $M_{\text{Lipid}}$ 为脂质的平均分子质量,葵花籽油的平均分子质量取876.16 g/mol,亚麻籽油取542.6 g/mol; $\omega_{\text{Lipid}}$ 为初始反应容器中脂肪的质量/g。

#### 1.3.5.5 脂肪酸成分分析

肠消化阶段结束后,立即将消化产物在10 000 g下离心1 h,收集上清液。对消化产物中的脂肪酸进行甲酯化处理<sup>[26]</sup>。参考Ye等<sup>[27]</sup>的方法并稍作修改,将1 g上清液与10 mL质量分数14%三氯化硼-甲醇溶液混合,在70 °C水浴中反应20 min,取出冷却至室温。加入8 mL正己烷振荡2 min,再加10 mL饱和氯化钠溶液,静置分层取有机相过滤膜待分析。气相色谱条件为:色谱柱HP-5MS柱(30.00 m $\times$ 250.00  $\mu$ m,0.25  $\mu$ m);载气为氦气,流速为1.0 mL/min;采用不分流方式进样,进样口温度250 °C;程序升温条件为起始温度140 °C,保持2 min,以4 °C/min的速率升温至200 °C,保持10 min,以2 °C/min的速率升温至230 °C,保持0 min,以4 °C/min的速率升温至250 °C,保持10 min。脂肪酸的百分比组成使用峰面积计算。使用质谱数据库NIST17对质谱数据进行分析,筛选得分>85的化合物作为该未知化合物的可能成分<sup>[28]</sup>。

#### 1.3.6 基于气凝胶模板的油凝胶氧化稳定性的测定

将散装油和新鲜制备的油凝胶在50 °C下避光保存14 d。每隔1 d测定1次样品,以确定油凝胶和散装油的氧化稳定性的变化。

##### 1.3.6.1 过氧化值的测定

根据Hornero-Méndez等<sup>[29]</sup>的方法进行过氧化值(PV)测试,并进行了修改。将含有200 mg油的样品加入3 mL的 $V_{\text{甲醇}}:V_{\text{丁醇}}$ 比例为2:1的溶液中,涡旋30 s以提取油。将得到的混合物以4 000 r/min离心5 min。取离心后的上清液并与15  $\mu$ L硫氰酸铵溶液(3.94 mol/L)和15  $\mu$ L氯化亚铁溶液(0.072 mol/L)混合。将混合溶液在黑暗中孵育20 min,并在510 nm处测定吸光度值。以氯化铁为标准绘制标准曲线。PV( $y_2$ )按式(2)计算:

$$y_2 = \frac{(A_s - A_b) \times k}{55.84 \times m_0} \quad (2)$$

式中: $y_2$ 为PV值/meq/kg; $A_s$ 、 $A_b$ 分别为样品溶

液和试剂空白的吸光度; $k$ 为 $\text{Fe}^{3+}$ 标准曲线的斜率; $m_0$ 为样品的质量/kg。

### 1.3.6.2 硫代巴比妥酸值的测定

2-硫代巴比妥酸(TBA)值根据 Mohammadi 等<sup>[30]</sup>的方法测定。将含有 200 mg 油的样品溶解在正丁醇中,定容至 25 mL。然后取 5 mL 该溶液与 10 mL 质量分数 0.2% TBA 试剂混合,并在 95 °C 水浴中孵育 2 h。测定 523 nm 处的吸光度,TBA 值( $y_3$ )按式(3)计算:

$$y_3 = \frac{(A - B) \times 50}{m} \quad (3)$$

式中: $y_3$ 为 TBA 值/mg/kg; $m$ 为样品质量/kg; $A$ 、 $B$ 分别为样品溶液和试剂空白的吸光度。

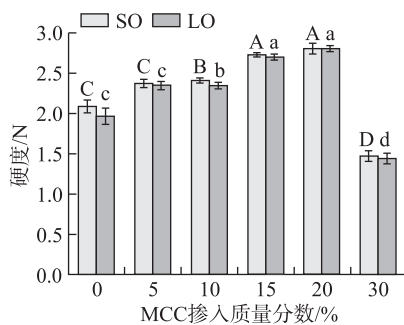
### 1.4 数据处理

所有实验至少重复 3 次,结果以平均值  $\pm$  标准差表示,采用 SPSS 22 对数据进行单因素方差分析和邓肯检验, $P < 0.05$  表示统计学上的显著差异。使用 Origin 2024 进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 油凝胶质构特性

采用质构仪对油凝胶样品的硬度进行分析,不同 MCC 掺比以及吸附不同油相制备的油凝胶硬度结果由图 1 可见。结果表明,随着 MCC 掺入质量分数的增加,由 SO 以及 LO 制备的油凝胶样品硬度呈现先增加后减少。这种变化的原因可能是由于在一定添加比例内,MCC 能够作为一种刚性填充物填充在气凝胶的孔隙内,对样品的整体结构提供支撑和稳定<sup>[31]</sup>。而当 MCC 质量分数继续增加时,油凝胶样品硬度降低,这可能是由于过量 MCC 颗粒在凝胶结构内离散分布,难以有效支持凝胶结构。复合油凝



注:大写字母代表不同纤维素添加量对负载葵花籽油(SO)后油凝胶硬度存在显著性差异,小写字母代表不同纤维素添加量对负载亚麻籽油(LO)后油凝胶硬度存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

图1 负载不同油相 SPI/MCC 油凝胶的硬度

胶的硬度变化趋势表明,气凝胶基的油凝胶硬度主要受其前体气凝胶的孔隙结构以及机械填充情况影响。

### 2.2 油凝胶流变特性

为进一步探究复合油凝胶的物理性质,进行了流变测量。使用不同油相制备的 SPI/MCC 油凝胶的频率扫描由图 2 可见,所有油凝胶样品的储能模量( $G'$ )均大于损耗模量( $G''$ ),表明所有制备的油凝胶均为半固体弱凝胶。在 0.01 ~ 100 Hz 的频率范围内,油凝胶的  $G'$  和  $G''$  的频率无显著相关性,表明油凝胶结构可以在一定程度上抵抗变形<sup>[32]</sup>。这可能是由于油凝胶中 SPI/MCC 颗粒形成的网络构成了塑性结构<sup>[33]</sup>。此外,一定程度内 MCC 质量分数的增加(0% ~ 20%)使复合油凝胶的  $G'$  和  $G''$  值有所提高,这可能是由于 MCC 颗粒的掺入增强了复合油凝胶的刚度<sup>[34]</sup>。然而,在所有样品中,SOM30 和 LOM30 样品的  $G'$  和  $G''$  最低,可能是因为此时油凝胶含油量较高,剪切后的颗粒沉降。此外,不同油相制备的油凝胶表现出相似的  $G'$  和  $G''$ ,表明油类型对复合油凝胶颗粒网络结构的影响有限。这与 Plazzotta 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。

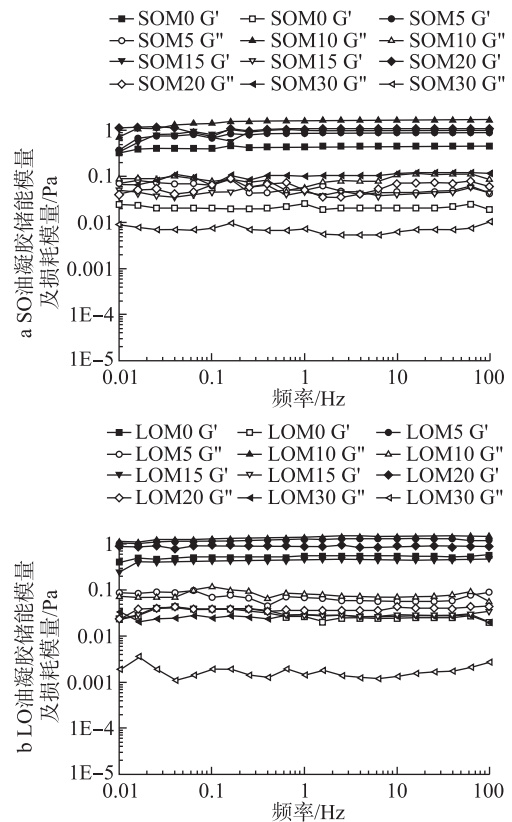
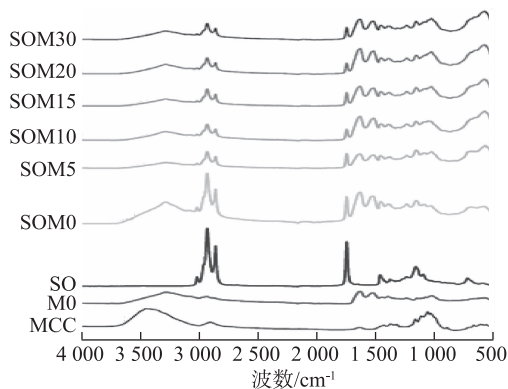


图2 葵花籽油和亚麻籽油制备的大豆蛋白/微晶纤维素油凝胶的频率扫描

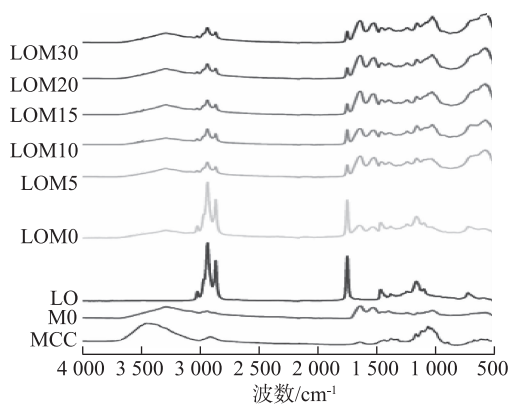
由此可见, SPI/MCC 复合气凝胶可用于从 LO 和 SO 油相中制备具有不同结构和成分的油凝胶, 其结构随着前体气凝胶成分比例不同而发生变化。

### 2.3 油凝胶结构特性

图3为 SPI/MCC 复合油凝胶以及 LO、SO、MCC 和 SPI 气凝胶的 ATR-FTIR 光谱, 所有复合油凝胶的红外光谱均呈现蛋白质和纤维素的特征峰。除此之外, SO 以及 LO 的红外光谱均包含了大多数食用油中所含的甘油三酯特征<sup>[35]</sup>。具体表现为 3 008、2 924 以及 2 853  $\text{cm}^{-1}$  的特征峰, 这归因于亚甲基和甲基的  $=\text{C}-\text{H}$  和  $-\text{C}-\text{H}$  的拉伸振动<sup>[35]</sup>; 1 745  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰归因于  $\text{C}=\text{O}$  双键拉伸振动; 1 235、1 160 和 1 096  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰与  $\text{C}-\text{H}$  的变形和弯曲以及  $\text{C}-\text{O}$  的拉伸振动有关<sup>[36,37]</sup>。油凝胶的 ATR-FTIR 图谱中具有蛋白、MCC 以及油的特征峰且没有新的特征峰生成, 表明气凝胶模板与液体油之间不存在化学相互作用, 即油凝胶的形成主要依赖于气凝胶之间对油的物理吸附作用。除此之外, 2 种液体油脂制备的复合油凝胶样品的 ATR-FTIR 光谱



a 葵花籽油(SO)制备的SPI/MCC 油凝胶ATR-FTIR光谱



b 亚麻籽油(LO)制备的SPI/MCC 油凝胶ATR-FTIR光谱

图3 不同油相制备的SPI/MCC油凝胶的ATR-FTIR光谱

之间没有明显差异, 这说明复合油凝胶样品的结构特征不受油相种类影响。

### 2.4 基于气凝胶模板的油凝胶消化特性分析

#### 2.4.1 消化产物微观结构

不同油相制备的 SPI/MCC 复合油凝胶经过口腔、胃、小肠消化过程后的微观形态由图4可见, 前期预处理时, 油凝胶经历了轻微破碎, 导致部分油滴渗漏, 因此在口腔相中观察到较大的油滴, 但大部分油滴仍处于油凝胶结构中。散装油则表现出大油滴。

油凝胶经过胃消化后, 可观察到不规则的聚集体, 且随着 MCC 掺入质量分数增加, 聚集体数量增多。一方面, 这可能是因为胃蛋白酶水解了气凝胶中的蛋白质骨架, 导致油滴暴露, 发生聚集现象<sup>[25]</sup>; 另一方面, 胃部的酸性环境使部分油滴带正电, 而 MCC 是一种表面带负电的阴离子多糖<sup>[38]</sup>, 通过静电吸附作用, 油滴与 MCC 颗粒之间发生絮凝, 这种絮凝效应随着 MCC 比例的增加而增强。液体油在胃消化阶段以较大油滴的方式存在, 这表明油滴在胃消化阶段不受消化影响。

当油凝胶处于肠道消化阶段时, 大部分聚集体发生解聚, 形成了小且均匀的油滴。这可能是由于肠道消化液中的胆盐和脂肪酶协同消化了油凝胶中的脂肪, 胆盐的乳化作用促使油滴分散细化, 易于被脂肪酶消化<sup>[39]</sup>, 液体油也表现出相同的趋势。同时, 高 MCC 比例可以促进油凝胶消化产物保留更多的聚集体, 这说明了高浓度的 MCC 可以抑制脂质的分解。此外, SO 油凝胶相较于 LO 油凝胶的肠道消化产物, 剩余油滴更少, 这说明了 SO 油凝胶中的油脂在肠道消化过程中能进行更充分的分解。

#### 2.4.2 消化产物粒径的测定

图5展示了不同油相制备的 SPI/MCC 复合油凝胶在不同消化阶段所得的消化产物平均粒径。在口腔阶段, 所有油凝胶消化产物粒径较大, 这可能是由于在前处理过程中, 部分油滴渗漏, 而大部分油滴仍被封装在凝胶结构中。

在胃消化阶段, 由于胃液中含有胃蛋白酶, 凝胶中的蛋白质可能在胃消化阶段被水解, 导致更多小油滴释放, 因此胃消化阶段的油滴平均粒径减小。液体油在胃消化阶段未被分解, 因此粒径没有明显变化, 这与微观结构的结果一致。在胃消化阶段, 油凝胶的油滴平均粒径与 MCC 掺比成正比, 这可能是由于带有负电荷的 MCC 与表面带有正电荷的油滴通过静电作用相互吸引导致絮凝<sup>[38]</sup>。在絮凝过程中, MCC 可能同时吸附到多个液滴的表面上, 从而使

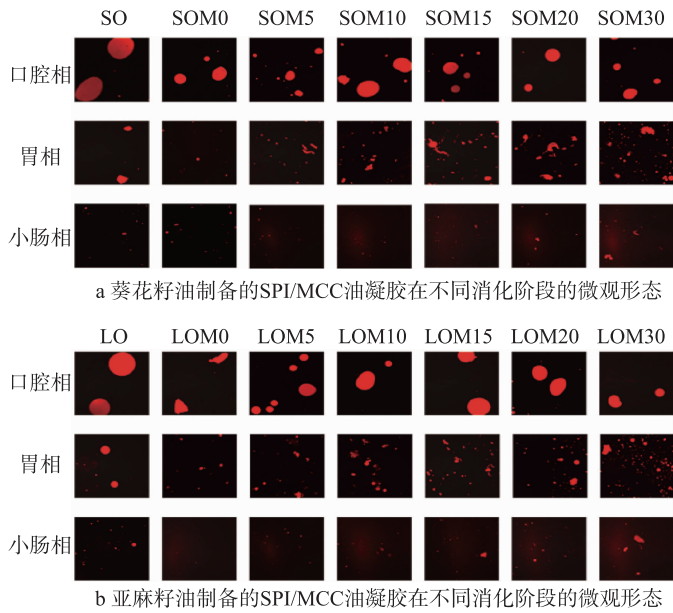
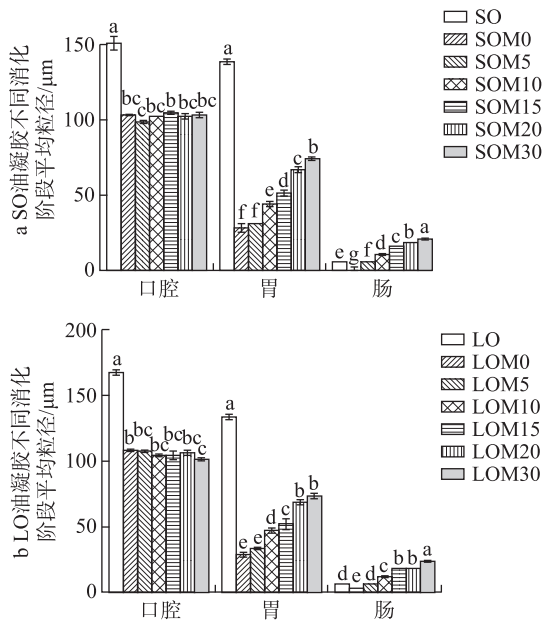


图4 葵花籽油和亚麻籽油制备的SPI/MCC油凝胶在不同消化阶段的微观形态

它们以簇的形式聚集<sup>[24]</sup>。这种絮凝效应随着MCC比例的增加而增强,由此导致平均粒径随之增加。

在小肠消化阶段,由于脂肪酶的水解,消化液中的大颗粒油滴减少<sup>[40]</sup>,油凝胶消化物的粒径显著降低。然而,随着MCC比例的增加,样品液滴尺寸逐渐增加。这可能由于高MCC掺入质量分数导致油凝胶结构更加紧密,比表面积更小<sup>[41]</sup>,样品与脂肪酶的接触受限,导致油凝胶脂质消化受到抑制。



注:不同小写字母代表不同纤维素添加量的油凝胶在不同消化阶段的粒径存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

图5 不同油相制备的SPI/MCC油凝胶在不同消化阶段的平均粒径

### 2.4.3 游离脂肪酸释放率的测定

脂质消化依赖于其界面行为,主要体现在该过程需要脂肪酶吸附到脂质表面,从而实现脂质的消化分解<sup>[42]</sup>。脂质消化率可通过分析体外消化过程中脂肪分解程度来确定<sup>[43]</sup>。由图6可见,所有油凝胶样品具备相似的FFA释放趋势,样品在消化前60 min内快速释放FFA,随后释放速率逐渐减缓。这可能是由于在消化前期,脂肪酶与油滴快速结合导致油脂快速降解;但在肠消化后期,脂肪酸分解产物不断堆积,减少了脂肪酶与脂质的界面接触,从而导致FFA释放减缓<sup>[44]</sup>。

由图6可见,未添加MCC的油凝胶的脂质消化程度最高。这可能是由于未掺入MCC的油凝胶样品在肠消化过程中更易与肠道消化液中的胆汁盐接触,从而促进蛋白质乳化剂脱离油水界面,使肠液中的脂肪酶更易于接触到脂质<sup>[45]</sup>。油凝胶样品的FFA释放率随MCC掺入质量分数的增加而下降。这可能是由于MCC在带有正电荷的油滴表面形成静电吸附层。一方面,MCC形成的静电吸附层能够物理阻隔脂肪酶与油滴进一步接触<sup>[46]</sup>;另一方面,MCC促进脂质聚集体的形成,从而减小油滴与脂肪酶的接触面积<sup>[47]</sup>,进而抑制脂质消化。Bai等<sup>[41]</sup>也发现了类似的现象,他们在较高纤维素纳米晶(CNC)水平下的样品中观察到更加缓慢的脂质消化速率,并

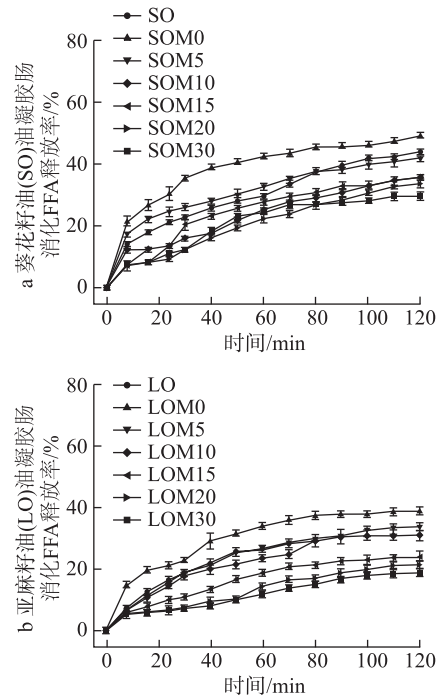


图6 葵花籽油(SO)和亚麻籽油(LO)制备的SPI/MCC油凝胶在肠消化过程中的游离脂肪酸释放率

将其归因于脂滴表面覆盖了相对致密的 CNC 层,从而限制油滴与脂肪酶的接触。此外,迟缓的脂质消化速率能够增加人体饱腹感,从而降低能量吸收,有利于人体健康<sup>[48]</sup>。因此,适当添加 MCC 可利于调节人体对脂质的吸收。

与此同时,相同 MCC 掺比的 SO 油凝胶较 LO 油凝胶具备更高的 FFA 释放率,这主要是因为 2 种油的饱和脂肪酸结构具有差异,从而导致不同油的空间结构发生变化<sup>[39]</sup>。含有单不饱和脂肪酸的甘油三酯相较于含有多不饱和脂肪酸的甘油三酯更易被脂肪酶水解<sup>[49,50]</sup>。LO 富含  $\omega-3$  多不饱和脂肪酸<sup>[51]</sup>,而 SO 的脂肪酸组成主要为油酸和亚油酸,其次为棕榈酸<sup>[39]</sup>。这可能是导致 SO 油凝胶脂肪消化率更高的原因。因此,油凝胶的脂肪消化程度受油相类型的影响,且 MCC 能够调节肠道中的脂质消化。

#### 2.4.4 脂肪酸成分分析

表 2 为使用气相色谱-质谱(GC-MS)分析未掺入以及高掺比 MCC 的油凝胶的脂肪分解产物的种类及相对含量分析。结果表明,MCC 的掺入对脂质消化产物成分没有显著性影响;而油相的类型对油凝胶的消化产物中 FFA 相对含量和种类产生了显著的影响。在所有油凝胶的脂质消化产物中,不饱和脂肪酸相对质量分数均超过 90%。LO 油凝胶的脂质产物中亚麻酸占有 FFA 质量分数 87%,而 SO 油凝胶则以油酸和亚油酸为主。其中 LO 脂质消化产物中的亚麻酸作为多不饱和脂肪酸难以被脂肪酶分解,进而导致 LO 油凝胶在肠消化阶段的脂质消化率较低,这与油凝胶 FFA 释放率一致。

表 2 不同油相制备的 SPI/MCC 油凝胶在肠消化过程中释放的脂肪酸组成和相对质量分数

油凝胶	w(棕榈酸) /%	w(亚油酸) /%	w(油酸) /%	w(亚麻酸) /%	w(硬脂酸) /%
SOM0	5.42 ± 0.31	60.74 ± 2.62	30.50 ± 0.89	ND	2.41 ± 0.10
SOM20	5.40 ± 0.05	62.28 ± 0.59	29.95 ± 0.48	ND	2.37 ± 0.06
LOM0	4.42 ± 0.12	4.53 ± 0.26	ND	87.71 ± 0.24	3.34 ± 0.14
LOM20	4.66 ± 0.12	4.73 ± 0.16	ND	87.17 ± 0.21	3.43 ± 0.25

注:SO 和 LO 分别为葵花籽油和亚麻籽油,ND 为未检出。

#### 2.5 基于气凝胶模板的油凝胶氧化稳定性分析

采用 14 d 加速储藏实验监测油凝胶品质,以油凝胶的一级氧化产物和二级氧化产物表征油凝胶的氧化稳定性。在储藏过程中,复合油凝胶和单纯油相的 PV 值与 TBA 值均显著上升,且所有油凝胶 PV 值和 TBA 值均低于单纯油相,表明气凝胶结构能够抑制油脂氧化。原因可能是,气凝胶模板通过限制

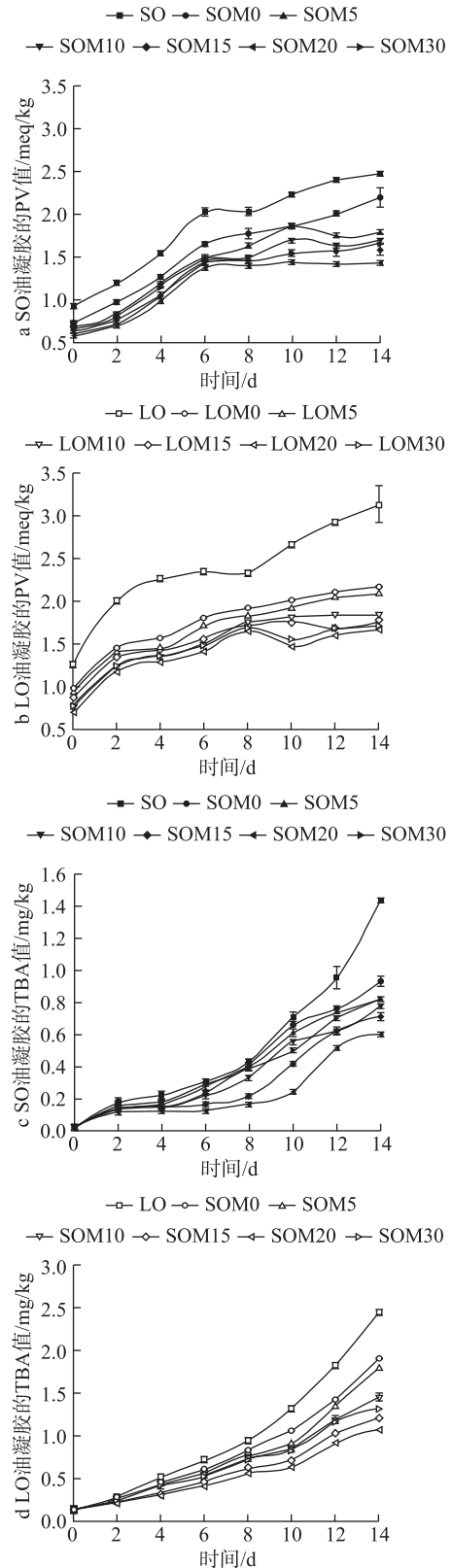


图 7 SO 油凝胶的 PV;LO 油凝胶的 PV;SO 油凝胶的 TAB 值; LO 油凝胶的 TAB 值在 14 d 储藏过程中的变化

液体油脂的流动和迁移,延缓油脂与光、氧气等物质接触,从而抑制脂质氧化<sup>[21]</sup>。此外,油凝胶中的网络结构可能阻碍自由基的移动,从而抑制次生氧化产

物的形成。

在所有油凝胶样品中,油凝胶的氧化稳定性与 MCC 掺入质量分数(0% ~ 20%)成正比。这可能是由于 MCC 颗粒作为物理屏障能够隔绝氧气,减缓促氧化剂的迁移率,从而抑制脂质氧化<sup>[52]</sup>;当 MCC 掺入质量分数提高到 30% 时,油凝胶的 PV 值和 TBA 值显著上升,这可能是由于此时油凝胶硬度较低,其较差的支撑性导致凝胶在储藏期间形变严重,与空气接触程度增加,最终使氧化风险增加<sup>[53]</sup>。

此外,SO 油凝胶相较于 LO 油凝胶具备更高的抗氧化能力,这可能是由于 2 种油凝胶采用的油相不同。脂肪酸链长和不饱和度与其抗氧化性能密切相关<sup>[54]</sup>。同时油脂氧化主要发生在双键中,因此含有高比例不饱和脂肪酸的油更容易被氧化<sup>[55]</sup>。在所有具有优异抗氧化性的油脂中,亚麻籽油中的不饱和脂肪酸质量分数最高(> 70%)<sup>[56]</sup>,这可能是导致 LO 及 LO 油凝胶氧化稳定性较低的原因。

### 3 结论

本研究用 SO 和 LO 制备了不同 MCC 掺入比例的 SPL/MCC 复合油凝胶。结果表明,油相种类(SO/LO)对凝胶的硬度、流变学特性(储能模量  $G'$ 、损耗模量  $G''$ )及红外光谱特征无显著影响,但 MCC 显著影响凝胶性能。红外光谱证实凝胶骨架与油脂间无化学相互作用。体外消化分析显示口腔期存在油脂渗漏,导致粒径增大,胃期形成油滴 - MCC 聚集体导致粒径减小,肠期聚集体解聚形成均一小油滴;MCC 掺入质量分数增加(> 20%)会加剧胃肠聚集作用、增大粒径、抑制 FFA 释放,但不改变最终消化产物的 FFA 组成;油相类型显著影响脂质消化度与最终产物:SO 油凝胶消化程度更高,其 FFA 以油酸(30%)和亚油酸(60%)为主,而 LO 油凝胶 FFA 中 87% 为亚麻酸。在氧化稳定性方面,LO 油凝胶更易氧化,而 MCC 的添加可显著改善氧化耐受性。综上,MCC 掺入(尤其是质量分数 20% 掺入比例为优)可有效提升 SPL/MCC 油凝胶氧化稳定性并抑制脂肪的快速消化,而油相脂肪酸组成则是决定消化特性与氧化行为差异的关键因素。

#### 参考文献

[1] Espinal - Ruiz M, Parada - Alfonso F, Restrepo - Sánchez L P, et al. Impact of dietary fibers(methyl cellulose, chitosan, and pectin) on digestion of lipids under simulated gastrointestinal conditions[J]. Food & Function, 2014, 5(12):3083 -

3095

[2] Bray G A, Paeratakul S, Popkin B M. Dietary fat and obesity: a review of animal, clinical and epidemiological studies [J]. Physiology & Behavior, 2004, 83(4):549 - 555

[3] Yang X, Dai J, Zhong Y, et al. Characterization of insoluble dietary fiber from three food sources and their potential hypoglycemic and hypolipidemic effects [J]. Food & Function, 2021, 12(14):6576 - 6587

[4] Zhao W, Wei Z, Xue C. Recent advances on food - grade oleogels: fabrication, application and research trends [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(27):7659 - 7676

[5] Martins A J, Vicente A A, Cunha R L, et al. Edible oleogels: an opportunity for fat replacement in foods [J]. Food & Function, 2018, 9(2):758 - 773

[6] Bascuas S, Morell P, Hernando I, et al. Recent trends in oil structuring using hydrocolloids [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118:106612

[7] Abdullah, Liu L, Javed H U, et al. Engineering emulsion gels as functional colloids emphasizing food applications: a review [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9:890188

[8] De Marco I, Baldino L, Cardea S, et al. Supercritical gel drying for the production of starch aerogels for delivery systems [J]. Chemical Engineering Transactions, 2015, 43: 307 - 312

[9] Manzocco L, Mikkonen K S, García - González C A. Aerogels as porous structures for food applications: smart ingredients and novel packaging materials [J]. Food Structure, 2021, 28:100188

[10] Li J, Zhang C, Li Y, et al. Fabrication of aerogel - templated oleogels from alginate - gelatin conjugates for *in vitro* digestion [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291:119603

[11] Plazzotta S, Calligaris S, Manzocco L. Structural characterization of oleogels from whey protein aerogel particles [J]. Food Research International, 2020, 132:109099

[12] Shan G, Cui M, Wang X, et al. Dual - reinforcement strategy: fabrication of CMC - Na/SPI aerogel - templated oleogels through electrostatic adsorption and chemical crosslinking [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148:109525

[13] Carvalho L, Pereira I D O, Andreani L, et al. Production of oleogels from cellulose and starch cryogels: morphological, thermal, mechanical, and viscoelastic properties [J]. LWT - Food Science and Technology, 2025, 217:117406

[14] Eastwood M, Kritchevsky D. Dietary fiber: how did we get where we are? [J]. Annual Review of Nutrition, 2005, 25:1 - 8

[15] Borreani J, Espert M, Salvador A, et al. Oil - in - water emulsions stabilised by cellulose ethers: stability, structure

- and in vitro* digestion[J]. *Food & Function*, 2017, 8(4): 1547–1557
- [16] Kendall C W C, Esfahani A, Jenkins D J A. The link between dietary fibre and human health[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(1):42–48
- [17] Chen F, Deng Z, Zhang Z, et al. Controlling lipid digestion profiles using mixtures of different types of microgel: alginate beads and carrageenan beads[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 238:156–163
- [18] Kalashnikova I, Bizot H, Cathala B, et al. New Pickering emulsions stabilized by bacterial cellulose nanocrystals[J]. *Langmuir*, 2011, 27(12):7471–7479
- [19] Regand A, Goff H D. Structure and ice recrystallization in frozen stabilized ice cream model systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17(1):95–102
- [20] Wang Y, Shi J, Xu Y, et al. The digestion fates of lipids with different unsaturated levels in people with different age groups[J]. *Food Chemistry*, 2024, 438:137400
- [21] Zhao W, Wei Z, Xue C, et al. Development of food-grade oleogel via the aerogel-templated method: oxidation stability, astaxanthin delivery and emulsifying application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134:108058
- [22] Cebi N, Yilmaz M T, Sagdic O, et al. Prediction of peroxide value in omega-3 rich microalgae oil by ATR-FTIR spectroscopy combined with chemometrics[J]. *Food Chemistry*, 2017, 225:188–196
- [23] Brodkorb A, Egger L, Alminger M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion[J]. *Nature Protocols*, 2019, 14(4):991–1014
- [24] Winuprasith T, Khomein P, Mitbumrung W, et al. Encapsulation of vitamin D<sub>3</sub> in Pickering emulsions stabilized by nanofibrillated mangosteen cellulose: impact on *in vitro* digestion and bioaccessibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83:153–164
- [25] Geng M J, Wang Z, Qin L, et al. Effect of ultrasound and coagulant types on properties of  $\beta$ -carotene bulk emulsion gels stabilized by soy protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123:107146
- [26] Lux P E, Schneider J, Müller F, et al. Location and variety but not phosphate starter fertilization influence the profiles of fatty acids, carotenoids, and tocopherols in kernels of modern corn (*Zea mays* L.) hybrids cultivated in Germany[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(9):2845–2854
- [27] Ye Z, Li R, Cao C, et al. Fatty acid profiles of typical dietary lipids after gastrointestinal digestion and absorption: a combination study between *in-vitro* and *in-vivo*[J]. *Food Chemistry*, 2019, 280:34–44
- [28] Mu Q, Su H, Zhou Q, et al. Effect of ultrasound on functional properties, flavor characteristics, and storage stability of soybean milk[J]. *Food Chemistry*, 2022, 381:132158
- [29] Hornero – Méndez D, PéRez – Gálvez A, Mínguez – Mosquera M I. A rapid spectrophotometric method for the determination of peroxide value in food lipids with high carotenoid content[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2001, 78(11):1151–1155
- [30] Mohammadi A, Jafari S M, Esfanjani A F, et al. Application of nano-encapsulated olive leaf extract in controlling the oxidative stability of soybean oil[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190:513–519
- [31] Huang J, Gao J, Qi L, et al. Preparation and properties of starch-cellulose composite aerogel[J]. *Polymers*, 2023, 15(21):4294
- [32] Jiang Q, Li P, Ji M, et al. Synergetic effects of water-soluble polysaccharides for intensifying performances of oleogels fabricated by oil-absorbing cryogels[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372:131357
- [33] Plazzotta S, Jung I, Schroeter B, et al. Conversion of whey protein aerogel particles into oleogels: effect of oil type on structural features[J]. *Polymers*, 2021, 13(23):4063
- [34] Bhattarai M, Penttilä P, Barba L, et al. Size-dependent filling effect of crystalline celluloses in structural engineering of composite oleogels[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2022, 160:113331
- [35] Sim S F, Ting W E. An automated approach for analysis of Fourier Transform Infrared (FTIR) spectra of edible oils[J]. *Talanta*, 2012, 88:537–543
- [36] Gurdeniz G, Tokatli F, Ozen B. Differentiation of mixtures of monovarietal olive oils by mid-infrared spectroscopy and chemometrics[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2007, 109(12):1194–1202
- [37] Rohman A, Che Man Y B. Quantification and classification of corn and sunflower oils as adulterants in olive oil using chemometrics and FTIR spectra[J]. *The Scientific World Journal*, 2012, 2012(1):250795
- [38] Xu D, Zhang J, Cao Y, et al. Influence of microcrystalline cellulose on the microrheological property and freeze-thaw stability of soybean protein hydrolysate stabilized curcumin emulsion[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2016, 66:590–597
- [39] Plazzotta S, Alongi M, De Berardinis L, et al. Steering protein and lipid digestibility by oleogelation with protein aerogels[J]. *Food & Function*, 2022, 13(20):10601–10609
- [40] Park S, Mun S, Kim Y R. Effect of xanthan gum on lipid digestion and bioaccessibility of  $\beta$ -carotene-loaded rice starch-based filled hydrogels[J]. *Food Research Interna-*

- tional, 2018, 105:440 – 445
- [41] Bai L, Lyu S, Xiang W, et al. Oil – in – water Pickering emulsions via microfluidization with cellulose nanocrystals: 2. *In vitro* lipid digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96:709 – 716
- [42] Wilde P J, Chu B S. Interfacial & colloidal aspects of lipid digestion[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 165(1):14 – 22
- [43] Lu M, Cao Y, Ho C T, et al. Development of organogel – derived capsaicin nanoemulsion with improved bioaccessibility and reduced gastric mucosa irritation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(23):4735 – 4741
- [44] Cheng L, Ye A, Hemar Y, et al. Modification of the interfacial structure of droplet – stabilised emulsions during *in vitro* dynamic gastric digestion; impact on *in vitro* intestinal lipid digestion[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 608:1286 – 1296
- [45] Rungraung N, Jain S, Mitbumrung W, et al. Controlling the *in vitro* gastrointestinal digestion of emulsified lipids by encapsulation within nanocellulose – fortified alginate beads[J]. Food Structure, 2022, 32:100266
- [46] Li Y, McClements D J. Modulating lipid droplet intestinal lipolysis by electrostatic complexation with anionic polysaccharides; influence of cosurfactants[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35:367 – 374
- [47] Hur S J, Lim B O, Decker E A, et al. *In vitro* human digestion models for food applications[J]. Food Chemistry, 2011, 125(1):1 – 12
- [48] Ghosh S, Rousseau D. Fat crystals and water – in – oil emulsion stability[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2011, 16(5):421 – 431
- [49] Pascoviche D M, Goldstein N, Fishman A, et al. Impact of fatty acids unsaturation on stability and intestinal lipolysis of bioactive lipid droplets[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 561:70 – 78
- [50] Zhang R, Zhang Z, Zhang H, et al. Influence of lipid type on gastrointestinal fate of oil – in – water emulsions; *in vitro* digestion study[J]. Food Research International, 2015, 75:71 – 78
- [51] Goyal A, Sharma V, Upadhyay N, et al. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9):1633 – 1653
- [52] Kargar M, Fayazmanesh K, Alavi M, et al. Investigation into the potential ability of Pickering emulsions (food – grade particles) to enhance the oxidative stability of oil – in – water emulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 366(1):209 – 215
- [53] Liu N, Lu Y, Zhang Y, et al. Surfactant addition to modify the structures of ethylcellulose oleogels for higher solubility and stability of curcumin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165:2286 – 2294
- [54] Li J, Liu J, Sun X, et al. The mathematical prediction model for the oxidative stability of vegetable oils by the main fatty acids composition and thermogravimetric analysis[J]. LWT – Food Science and Technology, 2018, 96:51 – 57
- [55] Shahidi F, Zhong Y. Lipid oxidation and improving the oxidative stability[J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(11):4067 – 4079
- [56] Yang J, Wen C, Duan Y, et al. The composition, extraction, analysis, bioactivities, bioavailability and applications in food system of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil; a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118:252 – 260.