

韭籽粕提取物对韭菜籽油微胶囊理化特性及体外消化的影响研究

孙 婕¹, 刘亦菲¹, 于英楠¹, 王 召², 孙彦青², 尹国友^{1*}

(1. 河南城建学院生命科学与工程学院, 平顶山 467036; 2. 平顶山市平丰种业有限公司, 平顶山 467001)

摘 要: **目的** 研究韭籽粕提取物对韭菜籽油微胶囊理化特性的影响。**方法** 通过扫描电子显微镜、溶解性和流动性实验、热重分析、傅里叶变换红外光谱等, 探究韭籽粕提取物对韭菜籽油微胶囊微观结构、包埋率、储存稳定性、溶解性及流动性等的影响; 利用体外模拟消化实验探究韭菜籽油在消化道中的释放情况。**结果** 添加韭籽粕提取物的微胶囊颗粒形状规则, 表面光滑、致密; 韭籽粕提取物能把微胶囊的包埋率提升至93.272%, 有效抑制微胶囊的氧化, 提高微胶囊的溶解性和流动性; 随着温度的升高, 添加韭籽粕提取物的微胶囊最大失重率有所下降, 韭籽粕提取物对微胶囊起到了一定保护作用; 红外光谱结果证明了微胶囊化效果好, 包埋成功; 在体外模拟消化实验中, 添加韭籽粕提取物的微胶囊能更有效地释放韭菜籽油, 提高了韭菜籽油在人体内的生物利用率。**结论** 本研究为韭菜籽油微胶囊产品开发、应用体系的构建提供了理论参考。**关键词:** 韭菜籽油; 韭籽粕提取物; 微胶囊; 理化特性; 体外模拟消化

Effects of Chinese leek seed meal extract on physicochemical properties and digestion of Chinese leek seed oil microcapsule *in vitro*

SUN Jie¹, LIU Yi-Fei¹, YU Ying-Nan¹, WANG Zhao², SUN Yan-Qing², YIN Guo-You^{1*}

(1. College of Life Science and Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China;

2. Pingdingshan Pingfeng Seed Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of Chinese leek seed meal extract on the physicochemical properties of Chinese leek seed oil microcapsule. **Methods** The effects of Chinese leek meal extract on the microstructure, embedding rate, storage stability, solubility and fluidity of Chinese leek seed oil microcapsules were investigated by scanning electron microscopy, solubility and fluidity experiment, thermogravimetry analysis and Fourier transform infrared spectroscopy, the release of leek seed oil in digestive tract was studied by simulated digestion experiment *in vitro*. **Results** The microcapsules with Chinese leek meal extract had regular shape and smooth and compact surface; Chinese leek meal extract could increase the embedding rate of microcapsules to 93.272%, effectively inhibiting the oxidation of microcapsules, improving the solubility and mobility of microcapsules; with the increase of temperature,

基金项目: 河南省科技计划重点科技攻关项目(132102210192、152102210091)、国家级大学生创新训练项目(202111765024)、与企业合作项目(CY-PF2021HZ-1)

Fund: Supported by the Key Science and Technology Project of Henan Province under Grant (132102210192, 152102210091), the National Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (202111765024), and the Horizontal Cooperation Project with Enterprises (CY-PF2021HZ-1)

***通信作者:** 尹国友, 博士, 讲师, 主要研究方向为生物化学与分子生物学。E-mail: yinguoyou@163.com

***Corresponding author:** YIN Guo-You, Ph.D, Lecturer, College of Life Science and Technology, Henan University of Urban Construction, Daxiangshan Road, Xincheng District, Pingdingshan 467036, China. E-mail: yinguoyou@163.com

the maximum weight loss rate of microcapsules supplemented with Chinese leek meal extract had a certain protective effect on microcapsules. The infrared results showed that the microencapsulation effect and the embedding was successful. In simulated digestion experiment *in vitro*, the microcapsules added with the extract of leek meal could release Chinese leek seed oil more effectively and improved the bioavailability of Chinese leek seed oil in human body.

Conclusion The study provides theoretical references for the development of Chinese leek seed oil microcapsules products and the establishment of application system.

KEY WORDS: Chinese leek seed oil; Chinese leek meal extract; microcapsule; physical and chemical characteristics; simulated digestion *in vitro*

0 引言

微胶囊化技术(microencapsulation)可以利用天然或合成的高分子材料如多糖等,将固体、液体或者气体物质进行包埋、封存制成一种固体微粒产品或者微型胶囊,从而保护被包裹的物料,达到最大限度地保持原有的生物活性及控释效果等作用^[1]。其主要应用在食品^[2-4]、医学领域^[5-6]、纺织品^[7]、生活用品^[8]及化妆品^[9]中,尤其是在功能性油脂的保护方面起到了非常重要的作用^[10-12]。

韭菜籽是韭菜成熟后干燥的种子,是我国传统的中药材之一^[13],兼具抗菌、抗氧化和抗癌特性,食用和药用价值极高^[14-16]。其主要含有硫化物、黄酮、甾体皂苷、多不饱和脂肪酸、膳食纤维、蛋白质、多糖等生物活性物质,在温补肝肾、健脾暖胃、止咳祛痰以及调经养身等方面有显著作用^[17-20]。鉴于当下“清洁标签”在食品生产中的重要性,天然提取成分来替代合成添加剂的方法一直深受人民关注^[21]。目前关于天然植物蛋白、多糖代替合成添加剂作为微胶囊包埋壁材的研究有很多^[22-23],而韭菜籽产品在生产中,韭菜籽提取物就是其中的主要副产品,富含多糖^[24-25]、多肽^[26]、膳食纤维^[27],具有很高的商业价值。

近来,关于韭菜籽油的研究比较少,主要集中在提取和成分分析方面^[28-29],鲜有关于韭菜籽副产品对韭菜籽油微胶囊理化性质影响方面的报道。因此本研究通过扫描电子显微镜、溶解性和流动性实验、热重分析、傅里叶变换红外光谱及体外模拟消化实验等,探究了韭菜籽提取物对韭菜籽油微胶囊微观结构、包埋率、储存稳定性、溶解性和流动性等理化特性的影响及对韭菜籽油在体外模拟消化道中释放情况的影响,以期对韭菜籽油的进一步开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

韭菜籽油(课题组超临界 CO₂ 流体萃取制备);韭菜籽粕(含油率<1%,课题组自制);明胶、阿拉伯胶、羧甲基纤维素钠(sodium salt of caboxy methyl cellulose, CMC)、辛烯基琥珀酸淀粉钠(starch sodium octenyl succinate, HI-CAP 100)、谷

氨酰胺转氨酶(glutamine transaminase, TG)、麦芽糊精(食品级,广东康达生物科技有限公司);氢氧化钠、无水乙醇、碘化钾、三氯甲烷(分析纯,洛阳市化学试剂厂);可溶性淀粉(纯度 98%,以达科技泉州有限公司);石油醚(分析纯,烟台市双双化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

PHS-3E 型 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司);SDPTOP XD 型显微镜(宁波舜宇生物科技有限公司);T25 型分散机(德国 IKA 公司);HH-S4 型恒温水浴锅(郑州长城科工贸有限公司);010-1SA 型电热恒温鼓风干燥箱(上海掌动医疗科技有限公司);ME204E 电子天平、TGA/DSC 1 同步热分析仪器(瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司);SCIENTZ-10ND 冷冻干燥机(宁波新芝生物科技有限公司);PEI inspect F50 扫描电镜[铂悦仪器(上海)有限公司];FT-IR 傅立叶变换红外光谱仪(美国 PE 公司);B-290 型喷雾干燥器(瑞士 BUCHI 公司);KQ5200DB 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 韭菜籽粕提取物的制备

参考尹国友等^[25]的方法。韭菜籽粕与去离子水(液料比为 1:15, *V:m*)置于超声仪中提取 2 h,上清液醇沉,4000 r/min 离心 20 min,冻干后备用。

1.3.2 韭菜籽油微胶囊的制备

参考陈静等^[30]和曹莹莹等^[31]的方法,略做改动。称取一定量壁材置于烧杯中,水浴搅拌使其进行充分溶解(对照组此时加入韭菜籽粕提取物)。而后加入韭菜籽油,并在 12000 r/min 条件下分散 3 min,制备成均匀的乳状液。在 40 °C 水浴下进行搅拌,加入 10% 乙酸溶液,调 pH 至 4.5 反应 15 min 后,冷却。再用 10% 氢氧化钠溶液将反应体系的 pH 调节至 6.0,加入一定量的 TG,保持 15 °C 左右的温度,固化 3 h。将制备好的微胶囊悬浊液静置分层,除去上清液,然后在进样温度 180 °C、进样速度 15 mL/min 喷雾干燥器内进行喷雾干燥。

1.3.3 韭菜籽油微胶囊包埋率测定

参考杨艳红等^[32]的方法。韭菜籽油微胶囊包埋率记为

$E(\%)$, 计算公式见式(1)。

$$E/\% = (1 - \frac{M_x}{M_y}) \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_x 为表面油质量, g;

M_y 为微胶囊总油质量, g。

根据各组壁材对韭菜籽油包埋率的测定结果, 选定最优壁材组合, 进行后续实验。

1.3.4 韭籽油微胶囊理化性质研究

(1) 韭籽油微胶囊扫描电镜观察

取少量干燥后微囊粉末, 粘于导电胶, 吹去多余粉末并喷金, 喷金厚度 100 μm , 在视野清晰且有代表性的条件下观察微胶囊形态。加速电压设定 10 kV。

(2) 韭籽油微胶囊溶解性

根据戚登斐等^[33]的方法并稍做修改。称取 5 g 韭菜籽油微胶囊溶于 50 mL 蒸馏水中, 恒温搅拌 5 min, 5000 r/min 离心 5 min, 取上清液于 90 $^{\circ}\text{C}$ 烘干, 按照式(2)计算溶解度 $Y(\%)$ 。

$$Y/\% = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 为上清液干物质质量, g;

m_2 为韭菜籽油微胶囊样品质量, g。

(3) 韭籽油微胶囊流动性研究

将漏斗固定在支架上, 并将微胶囊产品倒入漏斗中, 使样品通过漏斗落在下面固定直径的圆盘上, 逐渐累积粉末, 直到产品不能继续堆积, 按照式(3)计算休止角。

$$\tan\theta = \frac{h}{r} \quad (3)$$

式中: θ 为休止角, $^{\circ}$;

h 为物料堆高度, mm;

r 为圆盘半径, mm。

(4) 光照对韭菜籽油微胶囊储存稳定性的影响

避光贮藏: 将韭菜籽油微胶囊和韭菜籽油(未处理)分别置于棕色瓶中, 室温避光保存, 每 2 h 取样检测。

光照贮藏: 将韭菜籽油微胶囊和韭菜籽油(未处理)分

别置于透明瓶中, 室温自然光照保存, 每 2 h 取样 1 次。

按 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的滴定法测定过氧化值。

(5) 韭籽油微胶囊热稳定性分析

根据常馨月等^[34]的方法并稍做修改。采用同步热分析仪分析, 加样量为 5 mg, 升温范围 50~400 $^{\circ}\text{C}$, 升温速率为 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 氮气的流速为 20 mL/min, 以空白铝盒为对照组。

(6) 红外光谱分析

根据王悦^[35]的方法并稍做修改。溴化钾压片法分别对核芯、壁材进行红外光谱测试, 测试光谱范围 400~4000 cm^{-1} , 扫描频率 2 cm^{-1} 。

(7) 体外消化研究

在模拟胃液、肠液消化的过程中, 脂肪在脂肪酶的作用下, 释放游离脂肪酸(free fatty acids, FFA), 使体系的 pH 不断下降。利用氢氧化钠的消耗体积即可得出 FFA 的释放率^[36-37]。按照式(4)进行计算。

$$\text{FFAs}/\% = 100 \times \frac{V_{\text{NaOH}} \times C_{\text{NaOH}} \times W_{\text{韭菜籽油}}}{2 \times m_{\text{韭菜籽油}}} \quad (4)$$

式中: V_{NaOH} 为消耗的 NaOH 的体积, L;

C_{NaOH} 为 NaOH 的摩尔浓度, mol/L;

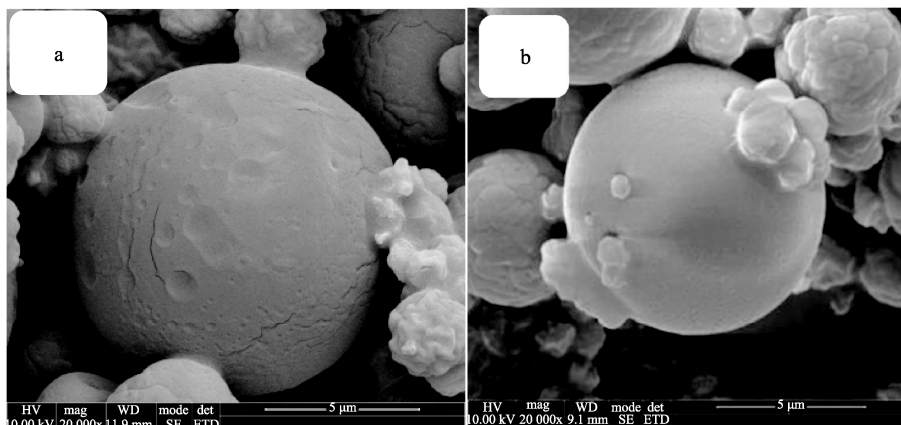
$W_{\text{韭菜籽油}}$ 为韭菜籽油的摩尔质量, g/mol;

$m_{\text{韭菜籽油}}$ 为 2 g 微胶囊粉末中油脂的质量, g。

2 结果与分析

2.1 微胶囊 SEM 观察

微胶囊颗粒的结构状态与微胶囊的流动性、保护芯材的能力密切相关。从图 1 可以看出, 同未添加韭籽粕提取物的微胶囊相比, 添加韭籽粕提取物的微胶囊颗粒, 整个外形表面较圆整, 形状规则, 近球形, 大小较不均匀, 大部分颗粒表面光滑、致密、连续、无裂痕^[36]。



注: a. 未添加提取物的微胶囊扫描电镜图; b. 添加提取物的微胶囊扫描电镜图。

图 1 微胶囊扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron microscope photographs of microcapsule

2.2 韭籽粕提取物对韭菜籽油微胶囊包埋率的影响

添加韭籽粕提取物的微胶囊,经5次重复实验得到包埋率的平均值为93.272%;未添加韭籽粕提取物的微胶囊包埋率的平均值为90.808%。添加韭籽粕提取物对微胶囊包埋率有一定影响。

2.3 韭籽粕提取物对韭菜籽油微胶囊稳定性的影响

2.3.1 60℃/室温条件下对韭菜籽油稳定性的影响

由图2可知,当处于60℃贮藏条件下,韭菜籽油微胶囊化可以有效地降低韭菜籽油氧化的程度。添加韭籽粕提取物和未添加韭籽粕提取物的韭菜籽油微胶囊,均能有效增强韭菜籽油的稳定性,不易氧化酸败。韭菜籽油经包埋后,由于有壁材包覆,减少了韭菜籽油与氧气的接触,从而降低了韭菜籽油的氧化程度^[38]。由图3可知,当处于室温条件下,韭菜籽油微胶囊同样可以有效地降低韭菜籽油的氧化程度,而添加韭籽粕提取物的微胶囊相比于未添加韭籽粕提取物的微胶囊氧化程度降低得多,更为稳定。

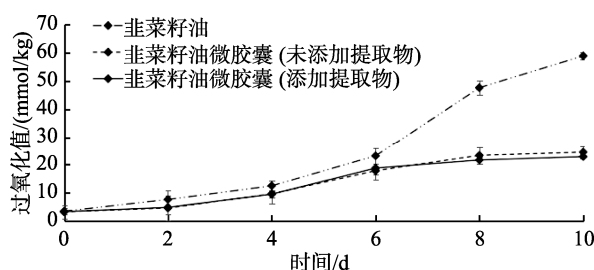


图2 在60℃条件下添加提取物与微胶囊化对韭菜籽油稳定性的影响($n=5$)

Fig.2 Effects of extracts and microencapsulation on the stabilities of Chinese leek seed oil at 60 °C ($n=5$)

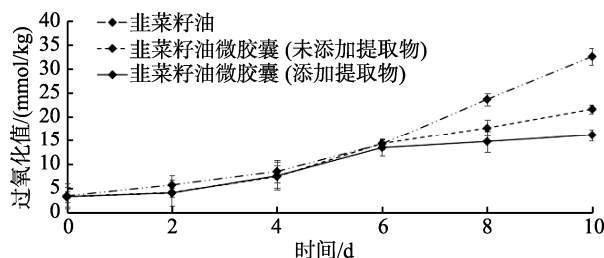


图3 室温条件下添加提取物微胶囊化对韭菜籽油稳定性的影响($n=5$)

Fig.3 Effects of extracts and microencapsulation on the stabilities of Chinese leek seed oil at room temperature ($n=5$)

2.3.2 光照/避光条件下对韭菜籽油稳定性的影响

由图4可知,当在光照的环境下时,微胶囊化可以有效地减少韭菜籽油氧化程度。光照会破坏油脂中不饱和双键结构,微胶囊化可降低光照对不饱和双键结构的破坏,故微胶囊化可有效降低油脂的氧化程度^[39]。由图5可知,在避光环境下,添加韭籽粕提取物的微胶囊壁材与未添加的相比更为稳定,能较大程度抑制韭菜籽油的氧化。

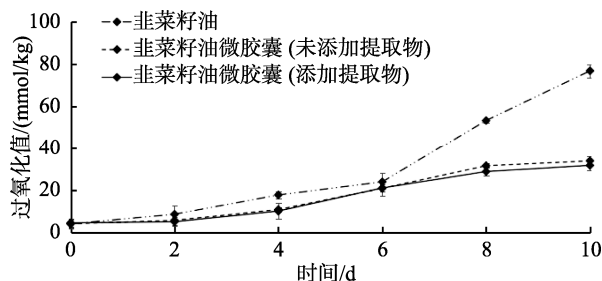


图4 在有光条件下添加提取物微胶囊化对韭菜籽油稳定性的影响($n=5$)

Fig.4 Effects of light on the stabilities of Chinese leek seed oil by adding extracts and microencapsulation ($n=5$)

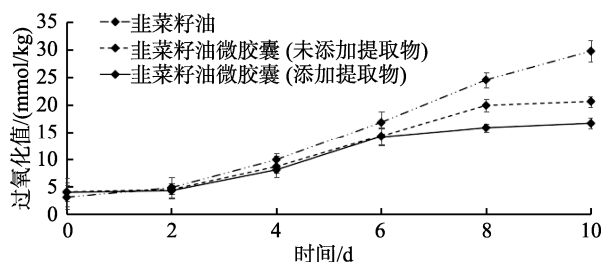


图5 在避光条件下添加提取物与微胶囊化对韭菜籽油稳定性的影响($n=5$)

Fig.5 Effects of microencapsulation and extract on stabilities of Chinese leek seed oil in dark condition ($n=5$)

2.4 韭菜籽油微胶囊溶解性分析

根据江连洲等^[40]的研究,微胶囊溶解性与微胶囊的粒径相关,微胶囊粒径越小,微胶囊溶解性越好。经实验表明,添加韭籽粕提取物的微胶囊溶解度为92.79%;未添加韭籽粕提取物的微胶囊溶解度为89.37%。添加韭籽粕提取物的微胶囊溶解性提高的原因可能是提取物中的多糖、蛋白质等成分利于微胶囊的溶解。

2.5 韭菜籽油微胶囊流动性

微胶囊粉末流动性越好,其休止角越小,当休止角介于30~45°时,粉末流动性较好,休止角大于60°时粉末流动性较差^[41-42]。添加韭籽粕提取物的韭菜籽油微胶囊休止角为41.62°±0.46°,未添加韭籽粕提取物的韭菜籽油休止角为45.47°±0.37°。因此可以判断制备得到的韭菜籽油微胶囊有较好的流动性和分散性,且添加韭籽粕提取物的微胶囊优于未添加韭籽粕提取物的微胶囊。

2.6 韭菜籽油微胶囊热稳定性分析

通过热重测试分析可知,韭菜籽油微胶囊在180℃前出现明显的平缓区,此时残留在微胶囊中的水分以及一些挥发性物质或小分子物质溢出并被干燥^[43],此阶段损失率为6%左右。当温度达到200℃时,由图6可知添加韭籽粕提取物的微胶囊开始失重,但下降趋势比较平缓,而未添加韭籽粕提取物的微胶囊失重较快,下降趋势曲线比较“陡”。当温度

达到 230 °C 左右时未添加韭籽粕提取物的微胶囊开始较快的失重,而添加韭籽粕提取物的微胶囊在 250 °C 才开始较快的失重。通过分析得,此时应是壁材被消耗所造成的样品快速失重。当温度达到 320 °C 左右时,2 种微胶囊均出现了一个较为平缓的失重曲线,此处应是壁材基本被完全分解,韭菜籽油开始被分解。在 500 °C 左右韭菜籽油基本被完全分解,热稳定性曲线趋于平缓,样品基本被完全分解(图 6)。总之,随着温度升高,添加韭籽粕提取物的微胶囊最大失重率降低。

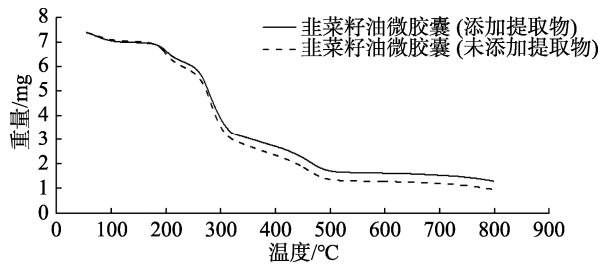


图 6 添加韭籽粕提取物对微胶囊热重损失率的影响

Fig.6 Effects of adding leek meal extract on thermal weight loss rate of microcapsules

2.7 红外光谱分析

如图 7, 韭菜籽油图谱中可见 1700 cm^{-1} 左右吸收峰, 为 C=O 及 C=C 特征吸收峰, 可以判断其为不饱和脂肪酸。另外, 韭菜籽油图谱中可见 2900 cm^{-1} 吸收峰, 为 C-H 伸缩振动区。韭菜籽油、未添加提取物微胶囊和添加提取物微胶囊的图谱中都可见 $1100\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ 区域吸收峰, 为 X-H 面内弯曲振动及 X-Y 伸缩振动区, 为脂肪烃, 说明微胶囊化效果较好, 为理想壁材, 证明了微胶囊的形成, 微胶囊化效果好, 包埋成功。添加提取物微胶囊和未添加提取物微胶囊的图谱具有很高的相似性。

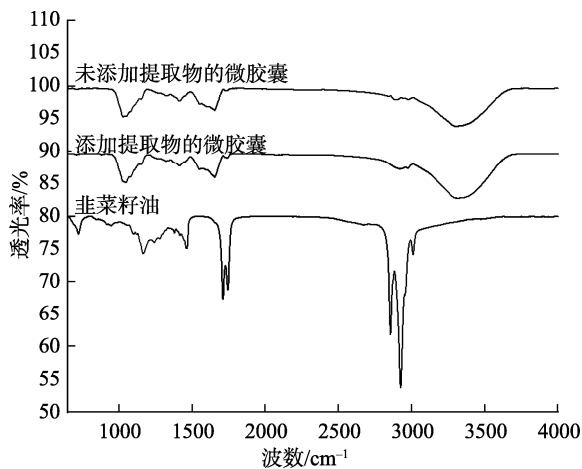
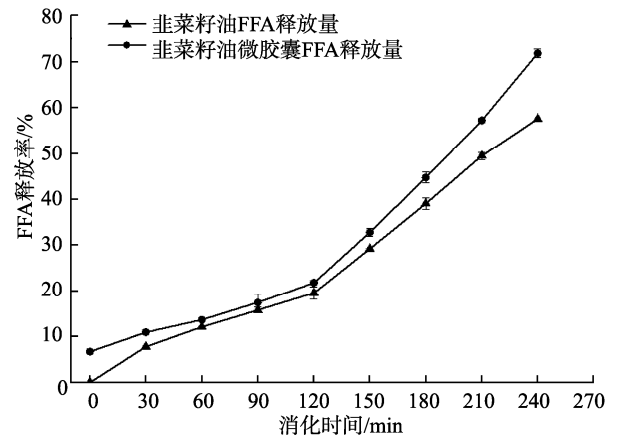


图 7 添加提取物及微胶囊化对韭菜籽油结构的影响

Fig.7 Effects of extracts and microencapsulation on the structure of Chinese leek seed oil

2.8 体外模拟消化结果

如图 8 所示, 韭菜籽油微胶囊在体外模拟实验中表现出良好的缓释特性。在含有胃蛋白酶的模拟胃液(simulated gastric fluid, SGF)中, 120 min 时, 由于复溶后的壁材在酸性环境中发生了絮凝, 阻止了胃蛋白酶与蛋白特异性位点的接触, 导致消化速率偏低^[44], 所以 FFA 释放率为 21.85%。随后进入含有胰酶的模拟肠液(simulated intestinal fluid, SIF), 到 240 min 时, FFA 释放率明显增加, 可达 71.85%, 这是由于在碱性环境中, 胰蛋白酶水解了壁材, 破坏了蛋白质-多糖的交联作用, 降低微胶囊结构的致密度, 可能导致壁材表面出现一些空隙, 增加芯材的渗出损耗^[36]。从整体来看, 同比未添加韭籽粕提取物的微胶囊, 添加韭籽粕提取物的 FFA 释放率有所提高, 表明韭籽粕提取物会在一定程度上可以使韭菜籽油在体外肠道内得到有效释放, 提高韭菜籽油的生物利用率。



注: 0~120 min 为 SGF 过程, 120~240 min 为 SIF 过程。

图 8 韭菜籽油微胶囊在 SGF 和 SIF 中 FFA 的释放率(n=5)

Fig.8 Release rates of FFA in SGF and SIF of Chinese leek seed oil microcapsule (n=5)

3 结论与讨论

在本研究中, 以韭菜籽油为芯材, 以 HI-CAP 100-麦芽糊精作为组合壁材, 通过复凝聚法成功制备了韭菜籽油微胶囊。通过对比分析发现, 添加韭籽粕提取物的微胶囊颗粒形状规则, 表面较光滑、致密, 并将微胶囊的包埋率从 90.808% 提升至 93.272%, 可有效提高韭菜籽油微胶囊的溶解性和流动性以及降低微胶囊的过氧化值, 抑制韭菜籽油的氧化。体外消化实验结果发现, 添加韭籽粕提取物的韭菜籽油微胶囊的 FFA 释放率同比未添加韭籽粕提取物的微胶囊有所提高, 可以初步判断韭籽粕提取物能使韭菜籽油在肠道内更有效释放, 提高了韭菜籽油在人体内的生物利用率。

参考文献

- [1] 王慧梅, 范艳敏, 王连艳. 基于微胶囊技术对油脂包埋的研究进展[J].

- 现代食品科技, 2018, 34(10): 195, 271–280.
- WANG HM, FAN YM, WANG LY. Research progress of microencapsulation technologies for lipid encapsulation [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(10): 195, 271–280.
- [2] HUANG HH, HUANG CX, YIN C, *et al.* Preparation and characterization of β -cyclodextrin-oregano essential oil microcapsule and its effect on storage behavior of purple yam [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(13): 4849–4857.
- [3] SILVIA AA, SUZANA CL. Dark chocolate with a high oleic peanut oil microcapsule content [J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(15): 5591–5597.
- [4] 石泽栋, 蒋雅萍, 孙英杰, 等. 牛至精油微胶囊的制备、表征及在杏贮藏期的抑菌效果[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 186–194.
- SHI ZD, JIANG YP, SUN YJ, *et al.* Preparation and characterization of oregano essential oil microcapsules and its effect on quality preservation of apricot fruit during storage [J]. Food Sci, 2021, 42(11): 186–194.
- [5] MATULYTE I, MARKSA M, BERNATONIENE J. Development of innovative chewable gel tablets containing nutmeg essential oil microcapsules and their physical properties evaluation [J]. Pharmaceutics, 2021, 13(6): 1–18.
- [6] THAKUR T, GAUR B, SINGHA AS. Bio-based epoxy/imidoamine encapsulated microcapsules and their application for high performance self-healing coatings [J]. Prog Org Coat, 2021, 159: 106436.
- [7] STAN MS, CHIRILA L, POPESCU A, *et al.* Essential oil microcapsules immobilized on textiles and certain induced effects [J]. Materials, 2019, 12(12): 2029.
- [8] 何荣, 张玄, 李荣全, 等. 柠檬香精微胶囊的制备及其在香味纸中的应用[J]. 东莞理工学院学报, 2021, 28(5): 118–123.
- HE Y, ZHANG X, LI RQ, *et al.* Preparation of flavor microcapsule and its application in fragrant paper [J]. J Dongguan Univ Technol, 2021, 28(5): 118–123.
- [9] GLICERIO LM, MARIA OF, RODRIGO OT, *et al.* Design of an emulgel-type cosmetic with antioxidant activity using active essential oil microcapsules of thyme (*Thymus vulgaris* L.), cinnamon (*Cinnamomum verum* J.), and clove (*Eugenia caryophyllata* T.) [J]. Int J Polym Sci, 2018, 1: 1–16.
- [10] PORRAS-SAAVEDRA J, PÉREZ-PÉREZ NC, VILLALOBOS-CASTILLEJOS F, *et al.* Influence of sechium edule starch on the physical and chemical properties of multicomponent microcapsules obtained by spray-drying [J]. Food Biosci, 2021, 43: 101275.
- [11] 符丽雪, 陈明明, 章采东, 等. 肉桂-丁香-百里香精油微胶囊的制备及表征[J]. 中国粮油学报, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210819.1800.004.html>
- FU LX, CHEN MM, ZHANG CD, *et al.* Preparation and characterization of cinnamon-clove-thyme essential oil microcapsule [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210819.1800.004.html>
- [12] 杨丽华, 张永东, 李维正, 等. 柠檬籽油复合微胶囊的制备及对牛肉干的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2021. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028666>
- YANG LH, ZHANG YD, LI WZ, *et al.* Preparation of lemon seed oil complex microcapsules and effect of preservation of beef jerky [J]. Food Ferment Ind, 2021. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028666>
- [13] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(第一卷)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the people's Republic of China (Volume 1) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015.
- [14] PUTNIC P, GABRIĆ D, ROOHINEJAD S, *et al.* An overview of organosulfur compounds from *Allium* spp.: From processing and preservation to evaluation of their bioavailability, antimicrobial, and anti-inflammatory properties [J]. Food Chem, 2019, 276: 680–691.
- [15] JAYA B, BUSHRA TM, PRATIKSHA T, *et al.* Study of phytochemical, anti-microbial, anti-oxidant, and anti-cancer properties of *Allium wallichii* [J]. BMC Comp Altern Med, 2017, 17(1): 1–9.
- [16] RIAZ A, LAGNIKA C, LUO H, *et al.* Effect of Chinese chives (*Allium tuberosum*) addition to carboxymethyl cellulose based food packaging films [J]. Carbohydr Polym, 2020, 235: 115994.
- [17] 李敬, 尤颖, 吕惠丽. 韭菜籽黄酮的微波辅助提取及其抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 1–4, 22.
- LI J, YOU Y, LV HL. Study on extraction of flavonoids from *Allium tuberosum* seed by microwave-assisted extraction method and the antioxidant activity [J]. China Cond, 2021, 46(6): 1–4, 22.
- [18] 李欢, 张梦飞, 苗明三. 韭菜籽的现代研究与思考[J]. 中医学报, 2017, 32(3): 430–432.
- LI H, ZHANG MF, MIAO MS. Modern research and thinking of leek rapeseed [J]. Acta Chin Med, 2017, 32(3): 430–432.
- [19] 周丽丽, 徐皓. 韭菜籽蛋白的提取及抗氧化活性研究进展[J]. 临床医药文献电子杂志, 2020, 7(11): 159, 161.
- ZHOU LL, XU H. Research progress on extraction and antioxidant activity of Chinese seed protein [J]. J Clin Med Liter, 2020, 7(11): 159, 161.
- [20] 刘梅, 商思阳, 贾琳, 等. 韭菜子等 10 味常用温肾助阳中药酒制历史沿革[J]. 中国现代中药, 2021, 23(1): 159–163.
- LIU M, SHANG SY, JIA L, *et al.* Historical evolution of *Semen alli tuberosi* and other 9 medicinal materials for kidney deficiency impotence processed with alcohol [J]. Mod Chin Med, 2021, 23(1): 159–163.
- [21] CLAIRE BC, KARIN S. Towards new food emulsions: Designing the interface and beyond [J]. Curr Opin Food Sci, 2019, 27: 74–81.
- [22] ZHANG Z, ZHAGN SS, SU RR, *et al.* Controlled release mechanism and antibacterial effect of layer-by-layer self-assembly thyme oil microcapsule [J]. J Food Sci, 2019, 6(84): 1427–1438.
- [23] UMAÑA M, TURCHIULI C, ROSSELLÓ C, *et al.* Addition of a mushroom by-product in oil-in-water emulsions for the microencapsulation of sunflower oil by spray drying [J]. Food Chem, 2021, 343: 128429.
- [24] 尹国友, 张佳宁, 孙婕, 等. 超声辅助热水浸提韭菜籽粕多糖工艺优化[J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(4): 86–92.
- YIN GY, ZHANG JN, SUN J, *et al.* Optimization of process in extracting polysaccharides by ultrasonic-assisted hot water from Chinese leek seed meal [J]. J Henan Univ Urban Const, 2019, 28(4): 86–92.
- [25] 尹国友, 孙婕, 澹博, 等. 双水相萃取韭菜籽粕多糖的工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(2): 134–142.
- YIN GY, SUN J, TAN B, *et al.* Study on optimal technology and antioxidant activity of polysaccharide extracted by two aqueous phase from Chinese leek seed meal [J]. J Food Sci Technol, 2021, 39(2): 134–142.
- [26] 孙婕, 尹国友, QI WANG, 等. 黑曲霉液态发酵韭菜籽粕提取韭菜籽肽工

- 艺[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 199–204, 209.
- SUN J, YIN GY, QI W, *et al.* Optimization on the production of polypeptide from Chinese leek seed meal by *Aspergillus niger* liquid fermentation [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(5): 199–204, 209.
- [27] 孙婕, 尹国友, 王超, 等. 混合发酵法制备韭籽粕水溶性膳食纤维[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(11): 95–99.
- SUN J, YIN GY, WANG C, *et al.* Preparation of soluble dietary fiber from Chinese leek seed meal by mixed fermentation [J]. Food Res Dev, 2017, 38(11): 95–99.
- [28] 王雯萱, 葛发欢, 张湘东. 韭菜子挥发油的 GC-MS 分析[J]. 中药材, 2015, 38(6): 1323–1324.
- WANG WX, GE FH, ZHANG XD. GC-MS analysis of essential oil from Chinese chive seed [J]. J Chin Med Mater, 2015, 38(6): 1323–1324.
- [29] 林小华, 叶惠娴, 徐巧钰, 等. 响应面优化超临界 CO₂ 萃取韭菜子油工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 50–53.
- LIN XH, YE HX, XU QY, *et al.* Optimization for supercritical CO₂ extraction of *Semen alli tuberosi* oil by response surface methodology [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2021, 36(8): 50–53.
- [30] 陈静, 张余, 陈志宏, 等. 复凝聚法制备玉米多肽微胶囊及释放特性研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2021, 33(2): 42–49.
- CHEN J, ZHANG C, CHEN ZH, *et al.* Study on preparation of corn peptide microcapsules by complex coacervation method and release characteristics [J]. J Hunan Univ Art Sci (Nat Sci Ed), 2021, 33(2): 42–49.
- [31] 曹莹莹, 包小康, 赵楠, 等. 复凝聚法制备芥末油微胶囊工艺优化及其理化特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 154–160.
- CAO YY, BAO XK, ZHAO N, *et al.* Process optimization and physicochemical properties analysis of mustard oil microcapsules prepared by complex coacervation [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(13): 154–160.
- [32] 杨艳红, 李湘洲, 周军, 等. 山苍子油微胶囊的制备技术比较及其释放动力学[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(7): 78–84.
- YANG YH, LI XZ, ZHOU J, *et al.* Comparative analysis of preparation methods and release kinetic of *Litsea Cubeba* essential oil microcapsules [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2018, 33(7): 78–84.
- [33] 戚登斐, 张润光, 韩海涛, 等. 核桃油中亚油酸分离纯化技术研究及其降血脂功能评价[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 104–108.
- QI DF, ZHANG RG, HAN HT, *et al.* Separation and purification of linoleic acid from walnut oil and its hypolipidemic function evaluation [J]. China Oils Fats, 2019, 44(2): 104–108.
- [34] 常馨月, 陈程莉, 董全. 奇亚籽油微胶囊的制备及表征[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 200–207.
- CHANG XY, CHEN CL, DONG Q. Preparation and characterization of China seed oil microcapsules [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(5): 200–207.
- [35] 王悦. 微藻油微胶囊的制备及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- WANG Y. Study on the preparation and properties of algal oil microcapsules [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [36] 杨小斌, 周爱梅, 王爽, 等. 蓝圆鲹鱼油微胶囊的结构表征与体外消化特性[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 117–122.
- YANG XB, ZHOU AIM, WANG S, *et al.* Structure characterization and in vitro digestibility of microencapsulated *Decapterus maruadsi* fish oil [J]. Food Sci, 2019, 40(1): 117–122.
- [37] 常馨月, 罗惟, 陈程莉, 等. 奇亚籽油微胶囊贮藏稳定性及缓释动力学[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 108–114.
- CHANG XY, LUO W, CHEN CL, *et al.* Study on storage stability and sustained-release kinetics of chia seed oil microcapsules [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(9): 108–114.
- [38] WANG B, ADHIKARI B, MATHESH M, *et al.* Anchovy oil microcapsule powders prepared using two-step complex coacervation between gelatin and sodium hexametaphosphate followed by spray drying [J]. Powder Technol, 2019, 358: 68–78.
- [39] 黄进宝, 唐冬, 刘香菊, 等. 茶籽油微胶囊的制备及其产品特性研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 82–89.
- HUANG JB, TANG D, LIU XJ, *et al.* Preparation of *Camellia* seed oil microcapsules and product properties [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2021, 36(4): 82–89.
- [40] 江连洲, 王朝云, 古力那孜·买买提努, 等. 干燥工艺对鱼油微胶囊结构和品质特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 86–92.
- JIANG LZ, WANG CY, GULINAZI MMTN, *et al.* Effect of drying processes on structural and quality properties of fish oil microcapsules [J]. Food Sci, 2020, 41(3): 86–92.
- [41] TURCHIULI C, FUCHS M, BOHIN M, *et al.* Oil encapsulation by spray drying and fluidised bed agglomeration [J]. Innov Food Sci Emerg, 2004, 6(1): 29–35.
- [42] 卢艳慧. 牡丹籽油微胶囊化及理化和稳定特性的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- LU YH. Study on microencapsulation, physicochemical properties and stability of tree peony seed oil [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [43] 梁博, 邵俊鹏, 杨帅, 等. 茶油微胶囊的制备及其缓释性能[J]. 精细化工, 2020, 37(12): 2541–2553.
- LIANG B, SHAO JP, YANG S, *et al.* Preparation and slow release properties of camellia oil microcapsules [J]. Fine Chem Ind, 2020, 37(12): 2541–2553.
- [44] WANG SJ, SHI Y, LI PH. Development and evaluation of microencapsulated peony seed oil prepared by spray drying: Oxidative stability and its release behavior during *in-vitro* digestion [J]. J Food Eng, 2018, 231: 1–9.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介

孙 婕, 博士, 教授, 主要研究方向为食品加工。

E-mail: jiesunvip2019@outlook.com

尹国友, 博士, 讲师, 主要研究方向为生物化学与分子生物学。

E-mail: yinguoyou@163.com