

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.032

超声辅助制备草鱼鱼油微胶囊及其贮藏稳定性和降血脂作用研究

Ultrasonic-assisted preparation, stability, and reducing blood lipid of fish oil microcapsule from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

刘晓丽^{1,2,3} 魏长庆^{4,5} 詹晓北⁶ 夏文水^{1,2,3}

LIU Xiao-li^{1,2,3} WEI Chang-qing^{4,5} ZHAN Xiao-bei⁶ XIA Wen-shui^{1,2,3}

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏 无锡 214122;

4. 石河子大学新疆植物药资源利用教育部重点实验室, 新疆 石河子 832003;

5. 石河子大学食品学院, 新疆 石河子 832003; 6. 江南大学生物工程学院, 江苏 无锡 214122)

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

3. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

4. Key Laboratory of Xinjiang Phytomedicine Resource and Utilization, Ministry of Education, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

5. School of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

6. School of Biological Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:以草鱼鱼油为芯材,壳聚糖(CTS)和大豆分离蛋白(SPI)为壁材,采用超声辅助均质和喷雾干燥法制备鱼油微胶囊,对其包埋率、粒径、热稳定性、贮藏稳定性、鱼油和微胶囊贮藏前后功能性脂肪酸含量变化和降血脂作用进行了研究。结果表明,制备的微胶囊包埋率达到77%、平均粒径为15.8 μm、玻璃化转变温度(T_g)为71 °C,且具有良好的贮藏稳定性;60 °C下,微胶囊贮藏15 d前后功能性脂肪酸含量变化不大;喂食鱼油和鱼油微胶囊组小鼠血清中的高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)均显著高于高脂模型组,总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)均显著低于喂食高脂模型组,说明鱼油微胶囊和鱼油能够显著降低血脂胆固醇。

关键词:鱼油;微胶囊;超声波;喷雾干燥;贮藏稳定性;降

血脂

Abstract: With grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) oil used as core material, chitosan (CTS) and soy protein isolate (SPI) as wall materials, CTS/SPI fish oil microcapsule product was prepared by use ultrasonic and spray drying. The embedding rate, particle size, thermal stability, storage stability, fish oil and microcapsule functional fatty acids content changes before and after storage and fall hematic fat action were studied. The results showed that the preparation of microcapsule embedding rate reached 77%, with the average particle size 15.8 μm, and the glass transition temperature (T_g) was 71 °C. The functional fatty acids content changed little at 60 °C, before and after 15 d storage. Feed the fish oil and fish oil microcapsule group of high density lipoprotein cholesterol (HDL-C) were significantly higher than the high fat model group, total cholesterol (TC) and low density lipoprotein cholesterol (LDL-C) were significantly lower than feeding high-fat model group, suggesting that fish oil microcapsules and fish oil could significantly reduce blood cholesterol.

Keywords: fish oil; microcapsule; ultrasonic; spray drying; storage stability; reducing blood lipid

基金项目:国家自然科学基金青年基金(编号: NSFC 31700709); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: JUSRP11903); 国家食品科学与工程一流学科建设项目(编号: JUFSTR20180201); 国家大宗淡水鱼产业技术体系(编号: CARS-45-26)

作者简介: 刘晓丽,女,江南大学副研究员,博士。

通信作者: 夏文水(1958—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: xiaws@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2019-05-31

中国渔业资源十分丰富,其中草鱼的养殖产量最

大^[1]。近年来,水产加工技术在得到快速发展的同时,有很多副产物在加工过程中得不到有效利用,造成资源的严重浪费^[2]。鱼腹中含有较高的脂肪,其中富含人体所必需的多不饱和脂肪酸如二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA),它们具有降低血清胆固醇含量^[3]、提高免疫力^[4]、提高视力^[5]、预防心脑血管粥样硬化^[6]和抗肿瘤等诸多生理作用^[7]。但由于鱼油自身鱼腥味的存在,同时在加工、贮藏和运输过程中一些鱼油多不饱和脂肪酸极易发生氧化酸败,产生异味,降低了产品的营养价值^[8]。而采用微胶囊化技术能够从根本上解决上述问题,进一步拓宽鱼油在生产和加工中的应用。

研究^[9]表明,采用微胶囊化技术包埋后的鱼油表面,会形成一层由有效壁材组成的保护层,该保护层的存在,不仅能掩盖其腥味、改变其物理状态、延长产品货架期,还能有效地控制鱼油的释放速率,提高其消化吸收率。但是液态鱼油在经微胶囊化后,其各种生物效应是否得到了保留,有关这方面的报道甚少。壳聚糖(Chitosan, CTS)和大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)是微胶囊化常用的壁材,其中壳聚糖是从甲壳动物的外壳中提取的一种天然生物多糖,具有良好的生物相容性^[10]、抗氧化活性^[11]、生物可降解性^[12]和抗菌活性等^[13],特别适合作为微胶囊壁材^[14]。目前,以壳聚糖和大豆分离蛋白为复合壁材对淡水鱼油进行微胶囊化的研究较少,而且未对其贮藏稳定性进行研究。同时,在制备过程中,通常使用高压均质制备微胶囊,但存在乳化过程中体系不均匀、形成的微胶囊大小和形态不均一的情况,而用超声代替高压均质,可以避免上述现象的发生,但目前未见将此方法应用在制备淡水鱼微胶囊中的报道。

试验以草鱼鱼油为芯材,以壳聚糖/大豆分离蛋白(CTS/SPI)为复合壁材,拟采用超声辅助均质和喷雾干燥法制备鱼油微胶囊,并对微胶囊贮藏稳定性及降血脂功效进行研究,以期为开发新的鱼油微胶囊产品和其在食品行业中的应用提供试验依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

草鱼鱼油:实验室精制;

壳聚糖(CTS): $M_w = 40$ kDa,脱乙酰度为 80%~90%,BR 级,实验室自制;

大豆分离蛋白(SPI):BR 级,源叶生物科技股份有限公司;

脂肪酸甲酯标准品:AR 级,美国 Supelco 公司;

雌性昆明系小鼠:体重(20±2)g,上海斯莱克实验动物有限公司;

基础饲料和高脂饲料:实验室自制;

总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、甘油三酯(TG)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C):南京建成生物工程研究所。

1.1.2 仪器与设备

紫外—可见分光光度计:UV-1800 型,上海天美科学仪器有限公司;

纳米粒度电位仪:Zetasizer nano ZS 型,英国 Malvern 公司;

高速剪切机:Ultraturrax T-10b 型,德国 IKA 公司;

电子精密天平:JB5374-91 型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

pH 计:FE20K 型,瑞士 Mettler Toledo 公司;

数控超声波清洗器:KQ-500 DE 型,昆山舒美超声仪器有限公司;

粒度仪:NanoBrook Omni 型,美国布鲁克海文有限公司;

喷雾干燥机:GZ-5 型,无锡市阳光干燥设备厂;

酶标仪:Multiskan Mk3 型,美国 Thermo 公司;

气相色谱仪:17A 型,日本岛津公司;

热重—差热综合分析仪:TG/DTA7300 型,日本 NSK 公司。

1.2 方 法

1.2.1 鱼油微胶囊的制备 一定量的 CTS 溶于 1% 的醋酸溶液中,按一定比例将添加了鱼油的 SPI 溶液逐滴加入到不断搅拌的 CTS 醋酸溶液中,在转速为 6 000 r/min 下乳化 5 min,使其形成均一的乳状液,用 1 mol/L 盐酸和 1 mol/L 氢氧化钠调 pH 至 6.5,40 °C 下超声均质 10 min (功率 200 W),在转速为 60 r/min 下,边加入一定量的谷氨酰胺转氨酶(18 U/g SPI)边低速搅拌,固化 1 h 后,静置分层、过滤、水洗收集湿囊,再经喷雾干燥后,得到干态鱼油微胶囊^[14]。整个体系鱼油与复合壁材的质量比为 1:2,制备获得鱼油微胶囊,包埋率为 77%,得率为 80%。

1.2.2 鱼油微胶囊包埋率的测定

(1) 表面鱼油含量测定:参照文献^[15],准确称取一定量的鱼油微胶囊,将其置于 50 mL 石油醚中振荡浸提 5 min 后过滤获得滤渣,再用 10 mL 的石油醚反复洗涤滤渣两次,快速过滤,将滤液转移至已恒重的圆底烧瓶中,于 40 °C 下旋转蒸发掉过量石油醚,于 105 °C 下烘干至恒重称量。按式(1)计算微胶囊表面鱼油含量。

$$M = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

M ——微胶囊表面油含量,%;

m_1 ——鱼油微胶囊的质量,g;

m_2 ——干燥圆底烧瓶的质量,g;

m_3 ——恒重后圆底烧瓶与鱼油微胶囊表面油的总质量, g。

(2) 总鱼油含量的测定:将准确称取的一定量的微胶囊样品充分溶解在 30 mL 的去离子水中,再加 50 mL 石油醚—无水乙醇混合液(1:1)重复萃取 2 次后,将萃取液合并转至已恒重质量的圆底烧瓶中,旋转蒸发,去掉多余的溶剂,置于 105 °C 烘箱中烘至质量恒定。按式(2)计算微胶囊总鱼油含量。

$$M = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

M ——微胶囊总鱼油含量, %;

m_1 ——鱼油微胶囊的质量, g;

m_2 ——干燥圆底烧瓶的质量, g;

m_3 ——恒重后圆底烧瓶与鱼油微胶囊总油的总质量, g。

(3) 鱼油微胶囊包埋率的测定:鱼油微胶囊包埋率是指包入微胶囊中的鱼油量与鱼油使用总量的百分比,计算公式如式(3)所示。

$$E = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

E ——包埋率, %;

m_1 ——表面油质量, g;

m_2 ——总油质量, g。

1.2.3 鱼油微胶囊粒径测定 取一定量的鱼油微胶囊,以蒸馏水为分散剂,将微胶囊置于水中分散均匀,用 NanoBrook Omni 粒度仪对微胶囊的粒径分布进行测定。

1.2.4 鱼油微胶囊的热重(TG/DTG)和差示量热扫描(DSC)分析 采用热重—差热综合分析仪,控制氮气流量 20 mL/min,从 30 °C 开始,以速率 10 °C/min 的速度升温至 800 °C 后结束,绘制鱼油微胶囊 TG/DTG 曲线,并对 CTS、SPI 和鱼油微胶囊的 DSC 进行分析。

1.2.5 鱼油微胶囊的贮藏稳定性 按照 GB 5009.227—2016,将鱼油和鱼油微胶囊分别置于 4, 37 °C 下贮存 60 d 进行周期试验,定期取样分别测定鱼油和鱼油微胶囊产品在不同贮藏条件下的过氧化值(POV),分析 POV 值的变化情况。

1.2.6 鱼油微胶囊脂肪酸含量测定 参照文献[16],用气相色谱法对原料鱼油、微胶囊化后鱼油贮藏前,及在 60 °C 下贮藏 15 d 后的脂肪酸含量变化情况进行测定。

1.2.7 鱼油微胶囊降血脂试验 试验小鼠经基础饲料喂养 1 周后,按照每组 10 只,分为 5 组,即分别为对照组(喂食基础饲料)、高脂模型组(喂食高脂饲料)、喂食 2 g/kg 的壁材复凝聚物+高脂饲料的 CTS/SPI 壁材组、喂食 2 g/kg 的鱼油微胶囊+高脂饲料的鱼油微胶囊组和喂食

1 g/kg 的鱼油+高脂饲料的鱼油组。其中,高脂模型组和对照组小鼠每天灌胃 0.2 mL 的蒸馏水,其他两组每次灌胃 0.2 mL 的鱼油和鱼油微胶囊溶液。28 d 后,用乙醚麻醉小鼠后,摘眼球取血,将全血静置于 4 °C 冰箱中 1.5 h 后,用冷冻离心机于 4 °C 下以 4 000 r/min 离心 15 min,分离血清,用于血脂检测[17]。

1.2.8 鱼油微胶囊降血脂作用测定

(1) 小鼠体重:每 7 d 称量并记录小鼠体重数据。

(2) 血脂含量检测:按照南京建成生物工程研究所试剂盒所述方法,对上述 1.2.7 中获得的血清中的 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 的含量进行测定。

1.2.9 数据处理与统计方法 对试验数据进行多重比较,差异显著性检验分析(SPSS 18.0, one-way ANOVA 方法)。

2 结果与分析

2.1 鱼油微胶囊粒径测定

从图 1 可以看出,以 CTS/SPI 为壁材制备的鱼油微胶囊粒径基本符合正态分布,分布比较均匀,有 73% 的微胶囊粒径集中在 10~25 μm ,其中 15~20 μm 的占 37%,平均粒径为 15.8 μm 。存在少量粒径较大的颗粒,可能是部分较小粒径的微胶囊在水中发生了团聚。

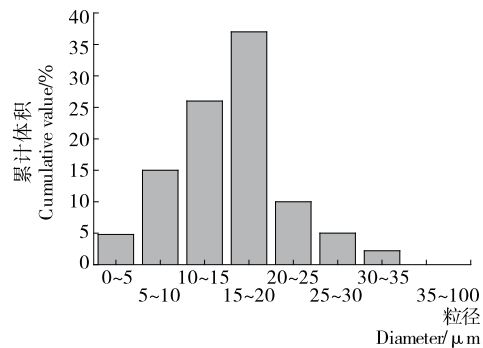


图 1 鱼油微胶囊粒径分布

Figure 1 Particle-size distribution of fish oil microcapsules

2.2 鱼油微胶囊的热重分析

热失重的过程可以反映出产品的分解过程,同时也可体现鱼油微胶囊的热稳定性。由图 2 可以看出,在程序升温情况下,鱼油微胶囊的质量有较大变化,主要可以分为以下几个阶段。在 30~110 °C 内曲线出现了小幅度下降,大约有 9.8% 的质量损失,此阶段损失的质量主要为微胶囊中的自由水及表面油脂氧化分解;在 110~490 °C 区间,曲线下降迅速,此过程中的质量损失达到 49% 左右,说明在此阶段鱼油微胶囊暴露并氧化分解,49~800 °C 区间内的质量损失为 26% 左右,该阶段的质量变化主要来自于微胶囊壁材的进一步热分解。因此,

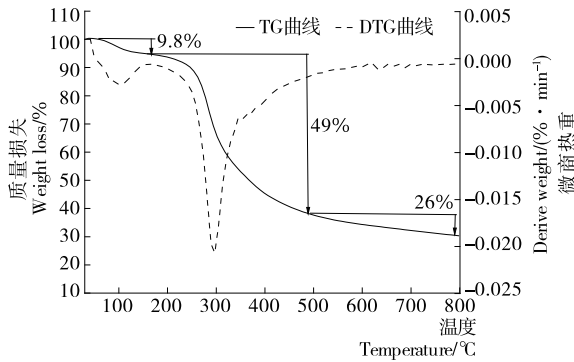


图 2 鱼油微胶囊热重分析图

Figure 2 Thermogravimetric analysis of fish oil microcapsules

根据微胶囊中鱼油的热分解温度范围可知,鱼油微胶囊表现出了较好的热稳定性。

2.3 差示量热扫描(DSC)分析

经 DSC 分析,CTS/SPI 和鱼油微胶囊的玻璃化转变温度(T_g)分别为 107,62,71 °C,鱼油微胶囊的 T_g 介于 CTS 和 SPI 之间,高出常温贮藏条件。这是因为在 CTS 的分子链的 C_6 和 C_3 位中含有活性羟基,在 C_2 位中含有活性氨基,这些活性基团可以与 SPI 中的极性基团发生化学反应,并产生交联作用,可使整个微胶囊产品具有比较稳定的壁材结构^[18],因此将鱼油微胶囊产品置于玻璃化转变温度以下贮藏时,体系中分子扩散和化学反应速率较低,能够长时间稳定存在^[19]。说明微胶囊化技术可以有效地减缓油脂氧化,提高微胶囊产品的贮藏稳定性,从而延长货架期^[20]。

2.4 鱼油微胶囊的贮藏稳定性

由图 3 可知,鱼油和鱼油微胶囊在 4 °C 下贮藏较 37 °C 贮藏具有较好的稳定性。同时发现,在相同的贮藏温度下,经微胶囊化后的鱼油,其氧化速度明显降低。在 4,37 °C 的贮藏温度下,微胶囊化后的鱼油的氧化程度比未微胶囊化鱼油分别降低了 24%,27%。而微胶囊化鱼油的过氧化值在贮藏初期也有所增加,是因为在微胶囊的表面仍存在一部分未被包埋的鱼油被氧化酸败^[21]。另一方面,在喷雾干燥过程中,高温使未经微胶囊壁材包埋的游离的鱼油发生了氧化,因此,在贮藏初期微胶囊化鱼油的 POV 值比未包埋鱼油的高^[22]。贮藏后期未微胶囊化鱼油的氧化程度明显高于微胶囊化鱼油,是因为微胶囊壁材(CTS/SPI)可以有效地减少鱼油与环境的接触,从而减缓氧化速率,延长货架期^[23]。

2.5 鱼油微胶囊脂肪酸含量测定

表 1 为鱼油和鱼油微胶囊在 60 °C 下,贮藏前和贮藏 15 d 后功能性脂肪酸含量的变化情况。通过对比发现,微胶囊化前后鱼油中主要功能性成分及其中饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸的相对含量变化不大。这可能是在形

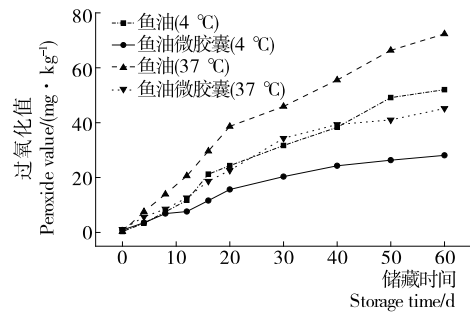


图 3 不同贮藏温度下鱼油和鱼油微胶囊 POV 值的变化趋势

Figure 3 The POV trend of fish oil and fish oil microcapsules at different temperature

成微胶囊后,CTS/SPI 微胶囊壁材有效地保护了鱼油中的不饱和脂肪酸,从而阻止了其氧化^[24]。鱼油在 60 °C 贮藏 15 d 前后对比发现,其中的主要功能性脂肪酸含量发生了明显的变化,单不饱和脂肪酸减小了 1.08%,饱和脂肪酸增加了 16.4%,多不饱和脂肪酸减小了 19.87%,说明鱼油经 15 d 后,已严重酸败。而以 CTS/SPI 为壁材制备的鱼油微胶囊经 60 °C 贮藏 15 d 后发现,其中的脂肪酸含量变化较小,各个成分都比较稳定,其中单不饱和脂肪酸减少了 0.54%,饱和脂肪酸增加了 1.47%,多不饱和脂肪酸减少了 0.86%。其中的油酸、亚油酸、棕榈油酸、 α -亚油酸、花生四稀酸和 γ -亚油酸等含量减小不明显。说明以 CTS/SPI 为壁材制备的鱼油微胶囊产品具有致密稳定的结构组成,可以有效地防止鱼油的氧化酸败。

2.6 鱼油微胶囊降血脂作用

2.6.1 小鼠体重指标 各组别小鼠体重的变化情况如表 2 所示,随着试验的进行,在喂养不同组别饲料情况下,各组小鼠均生长良好,其体重均随着喂养时间的延长而逐渐增加。在喂养到 28 d 时,5 组中高脂模型组的小鼠体重显著高于正常对照组。而鱼油微胶囊、CTS/SPI 壁材组和鱼油组各阶段小鼠的体重均略低于高脂模型组,说明鱼油微胶囊和 CTS/SPI 壁材对小鼠体重无显著影响。

2.6.2 鱼油微胶囊对小鼠血清中 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 含量的影响 由图 4 可知,高脂模型组小鼠血清在 TG 含量、LDL-C 含量和 TC 含量方面,和正常对照组相比,前者的 TG 和 LDL-C 含量均显著高于后者($P < 0.05$),TC 含量极显著高于后者($P < 0.01$)。高脂模型组与 CTS/SPI 壁材组血清中 TG 含量相当,但比鱼油组和鱼油微胶囊组中 TG 含量要高,且都无显著差异,说明鱼油微胶囊和鱼油对高脂血症小鼠 TG 水平无显著影响。在 TC 含量方面,CTS/SPI 壁材组的含量与高脂模型组相比,同样相差不大,无显著差异;而鱼油组和微胶囊组中 TC 的含量和高脂模型组相比,分别下降了 25% 和

表 1 鱼油与鱼油微胶囊贮藏前后功能性脂肪酸含量变化

Table 1 The variation of fatty acid content of fish oil and fish oil microcapsules before and after storage

脂肪酸	%			
	鱼油		鱼油微胶囊	
	0 d	15 d	0 d	15 d
单不饱和脂肪酸	38.55	37.47	37.66	37.12
饱和脂肪酸	34.23	50.63	35.21	36.68
油酸	33.69	30.43	32.15	31.55
多不饱和脂肪酸	25.21	5.34	24.18	23.32
ω -6 多不饱和脂肪酸	15.68	1.68	14.37	12.36
亚油酸	14.64	1.56	14.25	13.52
棕榈油酸	4.35	4.07	4.22	4.16
ω -3 多不饱和脂肪酸	3.02	1.11	2.87	2.16
α -亚油酸	2.55	0.58	2.26	2.15
花生四稀酸	0.71	0.19	0.71	0.65
二十二碳五烯酸	0.18	0.00	0.16	0.09
二十二碳六烯酸	0.17	0.00	0.16	0.14
二十碳五烯酸	0.16	0.12	0.13	0.11
γ -亚油酸	0.14	0.00	0.13	0.11

表 2 各组小鼠体重变化

Table 2 Weight changes of mice in each group ($n=10$)

组别	第 0 天	第 7 天	第 14 天	第 21 天	第 28 天
正常对照组	25.31±1.25	27.55±2.34	34.10±1.47	39.60±2.34	41.54±1.89
高脂模型组	25.93±1.12	34.47±1.98	41.28±3.11	45.91±2.65	49.57±1.97
CTS/SPI 壁材组	25.14±2.36	32.61±2.36	38.69±2.74	43.18±3.12	47.49±2.24
鱼油微胶囊组	25.80±3.01	31.22±2.45	37.21±2.03	42.12±2.25	46.91±3.11
鱼油组	25.70±1.87	32.63±2.78	38.52±3.04	42.73±1.68	45.32±2.43

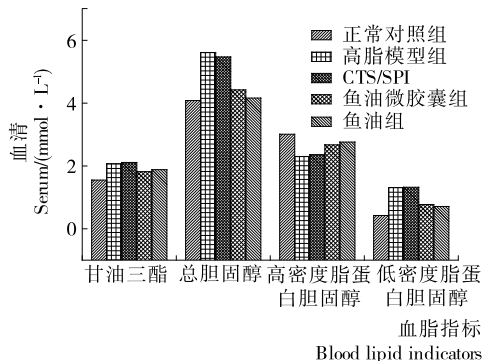


图 4 各组小鼠血脂水平

Figure 4 Blood lipid levels of mice in each group ($n=10$)

21%,说明鱼油和鱼油微胶囊对高血脂症小鼠血清中 TC 的降低有显著作用;对于小鼠血清中 HDL-C 的含量而言,与高脂模型组相比,正常对照组、鱼油组和鱼油微胶囊组小鼠血清中 HDL-C 含量均极显著高于高脂模型组,CTS/SPI 壁材组与高脂模型组相差不大。在

LDL-C 含量方面,与高脂模型组相比,CTS/SPI 壁材组与其无显著差异,但鱼油组和鱼油微胶囊组均极显著低于高脂模型组($P<0.01$)。说明鱼油和鱼油微胶囊能够显著地降低小鼠血脂胆固醇含量。

3 结论

在超声辅助下以 CTS/SPI 为壁材,以草鱼鱼油为芯材制备的鱼油微胶囊的包埋率为 77%,得率为 80%,并具有均匀的粒径分布,平均粒径为 15.8 μm ;鱼油微胶囊表现出了较好的热稳定性,其玻璃化转变温度为 71 $^{\circ}\text{C}$,高出常温贮藏条件。将微胶囊化前后的鱼油在 60 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏 15 d 后发现,鱼油中主要功能性成分及饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸的相对含量变化不大,各个成分都比较稳定,说明以 CTS/SPI 为壁材制备的鱼油微胶囊结构致密稳定,可以有效防止鱼油的氧化变质;此外,微胶囊壁材可以有效减少鱼油与环境的接触,从而减缓氧化速率,延长货架期;通过降血脂试验,研究了鱼油微胶囊对小鼠血清中 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 含量的影响,发现 CTS/SPI

组对高血症小鼠的血脂水平无调节作用,而鱼油微胶囊和鱼油组具有显著降低血脂胆固醇的作用。

参考文献

- [1] 农业部渔业局. 2018 中国渔业统计年鉴[Z]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 25.
- [2] 张雅婷, 王芳, 曹珍珍, 等. 草鱼内脏油脂的提取方法及贮藏特性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 121-125.
- [3] BLOM W, KOPPENOL W, HIEMSTRA H, et al. A low-fat spread with added plant sterols and fish oil lowers serum triglyceride and LDL-cholesterol concentrations in individuals with modest hypercholesterolaemia and hypertriglyceridaemia[J]. *Atherosclerosis*, 2018, 275: e153-e154.
- [4] WEST A L, MILES E A, LILLYCROP K A, et al. Postprandial incorporation of EPA and DHA from transgenic *Camelina sativa* oil into blood lipids is equivalent to that from fish oil in healthy humans[J]. *British Journal of Nutrition*, 2019, 122(1): 1-27.
- [5] BLOM W A M, KOPPENOL W P, HIEMSTRA H, et al. A low-fat spread with added plant sterols and fish omega-3 fatty acids lowers serum triglyceride and LDL-cholesterol concentrations in individuals with modest hypercholesterolaemia and hypertriglyceridaemia[J]. *European Journal of Nutrition*, 2018, 58(4): 1-10.
- [6] MANNINEN S, LANKINEN M, ERKKILÄ A, et al. The effect of intakes of fish and *Camelina sativa* oil on atherogenic and anti-atherogenic functions of LDL and HDL particles: A randomized controlled trial[J]. *Atherosclerosis*, 2019, 281: 56-61.
- [7] 左青, 左晖. 开发和利用海洋油脂资源[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(2): 6-10.
- [8] 蒋晨毓, 邱伟强, 贡三月, 等. 草鱼油爆前后风味物质的变化分析[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 192-199.
- [9] CHANG C, NICKERSON M T. Stability and in vitro release behaviour of encapsulated omega fatty acid-rich oils in lentil protein isolate-based microcapsules[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2018, 69(1): 12-23.
- [10] LIU Xiao-li, JIANG Qi-xing, XIA Wen-shui. One-step procedure for enhancing the antibacterial and antioxidant properties of a polysaccharide polymer: Kojic acid grafted onto chitosan[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 113: 1125-1133.
- [11] XIA Wen-shui, LIU Ping, ZHANG Jia-li, et al. Biological activities of chitosan and chitoooligosaccharides[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(2): 170-179.
- [12] YANG Wei-jun, FORTUNATI E, BERTOGLIO F, et al. Polyvinyl alcohol/chitosan hydrogels with enhanced antioxidant and antibacterial properties induced by lignin nanoparticles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 181(1): 275-284.
- [13] LIU Xiao-li, XIA Wen-shui, JIANG Qi-xing, et al. Chitosan oligosaccharide-N-chlorokojic acid mannich base polymer as a potential antibacterial material[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 182: 225-234.
- [14] DI GIORGIO L, SALGADO P R, MAURI A N. Encapsulation of fish oil in soybean protein particles by emulsification and spray drying[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 891-901.
- [15] LI Yuan, WU Chun-hua, WU Tian-tian, et al. Preparation and characterization of citrus essential oils loaded in chitosan microcapsules by using different emulsifiers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 217: 108-114.
- [16] POLAVARAPU S, OLIVER C M, AJLOUNI S, et al. Physicochemical characterisation and oxidative stability of fish oil and fish oil-extra virgin olive oil microencapsulated by sugar beet pectin[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(4): 1694-1705.
- [17] NGUYEN T D, PRYKHODKO O, HÅLLENIUS F F, et al. Monobutyrin reduces liver cholesterol and improves intestinal barrier function in rats fed high-fat diets[J]. *Nutrients*, 2019, 11(2): 308-325.
- [18] DU Yan-li, HUANG Guo-qing, WANG Hai-ou, et al. Effect of high coacervation temperature on the physicochemical properties of resultant microcapsules through induction of Maillard reaction between soybean protein isolate and chitosan[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 234: 91-97.
- [19] YE Qian-yu, SRINIVAS M, ZHOU Mei-fang, et al. Ultrasonically synthesized organic liquid-filled chitosan microcapsules Part 1: Tuning physical & functional properties[J]. *Soft Matter*, 2018, 14: 3202-3208.
- [20] GARCÍA-MORENO P J, PELAYO A, SEN Yu, et al. Physicochemical characterization and oxidative stability of fish oil-loaded electrosprayed capsules: Combined use of whey protein and carbohydrates as wall materials[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 231: 42-53.
- [21] NAJAFI M N, KADKHODAEI R, MORTAZAVI S A. Effect of drying process and wall material on the properties of encapsulated cardamom oil[J]. *Food Biophysics*, 2011, 6(1): 68-76.
- [22] 侯利霞, 王颖颖, 王晓霞. 冷榨芝麻油微胶囊乳状液乳化条件及乳化体系研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2015, 36(4): 44-48.
- [23] BUSOLO M A, TORRES-GINER S, PRIETO C, et al. Electrospraying assisted by pressurized gas as an innovative high-throughput process for the microencapsulation and stabilization of docosahexaenoic acid-enriched fish oil in zein prolamine[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 51: 12-19.
- [24] 石燕, 李倩, 李如一, 等. 淡水鱼油微胶囊的制备及其储藏稳定性[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(1): 80-84.