

草鱼鱼油微胶囊芯材释放条件及缓释特性研究

Release condition and sustained-release behavior simulation of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fish oil microcapsule core material

刘晓丽^{1,2,3}魏长庆^{4,5}夏文水^{1,2,3}LIU Xiao-li^{1,2,3} WEI Chang-qing^{4,5} 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)

(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. Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

摘要:以草鱼鱼油为芯材,大豆分离蛋白和壳聚糖为壁材,采用超声辅助均质和喷雾干燥法制备鱼油微胶囊;应用 Avrami's 公式对微胶囊在不同贮藏温度、相对湿度及光照强度下的芯材释放率进行拟合,并对释放动力学、释放速率常数和释放机制参数进行分析。结果表明,鱼油微胶囊芯材释放率拟合程度良好($R^2 > 0.97$),当贮藏温度 4~50 °C,相对湿度 34% 时,释放机制参数 $n < 1$,说明鱼油微胶囊芯材释放动力学介于扩散限制动力学和一级释放动力学之间;当相对湿度 54%~92%,光照强度 0~10 000 lx 时,释放机制参数 $n > 1$,鱼油微胶囊芯材释放动力学属于一级释放动力学,表明在低温、干燥和避光的条件下能更好地保存鱼油微胶囊。通过微胶囊在体外模拟消化道中的缓释行为发现,经 270 min,粒径从起始的 15.82 μm 减小到 2.98 μm ,释放率达 80.6%,说明微胶囊在模拟消化道中有缓释行为。

关键词:鱼油;微胶囊;释放动力学;体外释放

Abstract: With grass carp fish oil as core material, soybean pro-

tein isolate and chitosan as composite wall material, fish oil microcapsules were prepared by ultrasonic assisted homogenization and spray drying. In order to determine the release performance of core materials under different storage temperature, relative humidity and light intensity, the release kinetics of microcapsules under different storage conditions were investigated. The results indicated that release kinetic equations were significant and credible, with R^2 greater than 0.97. Moreover, the release mechanism parameters were less than 1 under the conditions of 4~50 °C and 34% relative humidity, which belonged to the diffusion-limited kinetics and first grade release. When the relative humidity was 54%~92%, the light intensity was 0~10 000 lx, and the release mechanism parameters were all greater than 1, which belonged to the first-order release kinetics. This indicated that the fish oil microcapsules could be better preserved at low temperature, drying and avoiding light. The particle size decreased from 15.82 μm to 2.98 μm after 270 min, and the release rate reached 80.6%, indicating that the microcapsule had sustained release behavior in the simulated digestive tract.

Keywords: fish oil; microcapsule; release kinetic; release in vitro

基金项目:国家自然科学基金(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项目(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: 2019-09-09

淡水鱼鱼腹中富含亚麻酸、二十二碳六烯酸(DHA)、亚油酸、二十碳五烯酸(EPA)、花生四烯酸等人体所需必需脂肪酸,研究^[1-3]表明这些必需脂肪酸具有降低血清胆固醇含量、提高视力、抗肿瘤、免疫调节等功能。但在加工、贮藏和运输过程中,一部分多不饱和脂肪酸容易发

生氧化酸败,不仅造成产品营养成分含量降低,还会产生具有刺激气味的酮类、醛类等物质,进一步降低产品营养价值^[4-5],鱼油氧化产生的自由基等甚至会诱发诸如脑溢血、高血压等疾病^[6]。利用多糖及蛋白包裹鱼油形成微胶囊技术,可以阻隔鱼油与空气的接触,达到保护芯材的目的,从而提高鱼油贮藏稳定性,拓展鱼油在生产和加工中的应用范围^[7-8]。

常见的微胶囊芯材释放动力学模型有零级^[9-10]、一级释放动力学方程^[11-12]、Avrami's 模型、Higuchi 模型^[13-15]等。在实际贮藏过程中,芯材的释放受温度、湿度、光照、pH 等诸多因素的影响,因此大部分芯材释放动力学模型为几种动力学的综合。Solomon 等^[16]研究发现香茅油微胶囊在贮藏 10 h 后,有 70% 的释放量,可控制释放过程;刘斯博等^[17]研究表明亚麻籽油微胶囊具有较好的耐高温性,但受湿度的影响较显著。

目前国内外的研究^[5,18-19]主要集中于微胶囊的制备工艺、理化性能,以及针对微胶囊芯材的释放过程,有关鱼油微胶囊释放动力学研究却鲜有报道。试验拟利用壳聚糖和大豆分离蛋白为壁材,草鱼鱼油为芯材,在前期制备出鱼油微胶囊的基础上,应用 Avrami's 公式对微胶囊在不同贮藏条件下芯材的释放率进行拟合,同时对释放动力学、释放速率常数和释放机制参数进行分析;研究体外模拟消化道环境对微胶囊芯材的缓释行为和粒径大小的影响,以期为鱼油微胶囊的贮藏与加工提供理论依据。

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):40 kDa,脱乙酰度 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;

胃蛋白酶(>250 U/mg)、胰蛋白酶(3 000~3 500 U/g):北京索莱宝科技有限公司;

其余试剂均为国产分析纯。

1.1.2 仪器与设备

高速剪切机:Ultraturrax T-10b 型,德国 IKA 公司;

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

pH 计:FE20K 型,美国 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;

粒度仪:NanoBrook Omni 型,美国布鲁克海文有限公司;

恒温恒湿培养箱:SPX-80B,北京市恒诺利兴科技有限公司;

喷雾干燥机:GZ-5 型,无锡市阳光干燥设备厂。

1.2 方法

1.2.1 鱼油微胶囊的制备 根据前期^[20]制备方法,将一定量的溶于 1% 醋酸溶液的 CTS、SPI 溶液与鱼油混匀后,6 000 r/min 剪切乳化 5 min,调 pH 至 6.5,40 ℃ 下超声均质 10 min,在加入谷氨酰胺转氨酶(18 U/g SPI)固定化的同时低速搅拌 1 h,静置分层,过滤,喷雾干燥,得鱼油微胶囊产品^[19-20]。其中,芯材与壁材(质量比)1:2,包埋率 77%,得率 80%。

1.2.2 不同贮藏条件下的释放行为 每 3 d 取适量样品计算芯材保留率,采用 Avrami's 公式进行拟合,建立微胶囊释放动力学模型,分析不同贮藏条件下芯材的释放规律。

(1) 贮藏温度:恒温恒湿培养箱相对湿度 32%、光照强度 0 lx,将样品分别置于 4,25,35,50 ℃ 特定温度下贮藏 21 d。

(2) 相对湿度:恒温恒湿培养箱光照强度 0 lx、温度 4 ℃,将样品分别置于 32%,54%,76%,92% 相对湿度下贮藏 21 d。

(3) 光照强度:恒温恒湿培养箱温度 4 ℃、相对湿度 32%,将样品分别置于 0,4 000,6 000,10 000 lx 光照强度下贮藏 21 d。

1.2.3 保留率及释放率计算 分别按式(1)、(2)计算芯材保留率及释放率。

$$R_1 = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 - Q_2} \times 100\%, \quad (1)$$

$$r = 1 - R_1, \quad (2)$$

式中:

R_1 ——保留率,%;

Q_1 ——总油含量,g;

Q_0 ——即时表面含油量,g;

Q_2 ——表面含油量,g;

r ——释放率,%。

1.2.4 释放动力学模型 Avrami's 公式如式(3)所示。

$$R_2 = \exp[-(kt)^n], \quad (3)$$

式中:

R_2 ——释放率,%;

k ——释放速率常数;

t ——贮藏时间,d;

n ——释放机制参数。

对式(3)取两次对数得:

$$\ln(-\ln R_2) = n(\ln k + \ln t) \quad (4)$$

以 $\ln t$ 、 $\ln(-\ln R_2)$ 分别为横、纵坐标拟合方程,从而求解出 n 和 k 值。

1.2.5 体外模拟人体消化道环境对鱼油微胶囊芯材释放的影响

(1) 人体口腔唾液(SOS):参照刘斯博等^[17]的方法配制 SOS 溶液。

(2) 胃液(SGF):分别准确称取 0.32 g 胃蛋白酶和 0.2 g 氯化钠,加入 100 mL 水溶解后,调节 pH 至 2.0,配制成 SGF 溶液。

(3) 肠液(SIF):分别称取 1.0 g 胰蛋白酶和 0.68 g 磷酸氢二钾,加入 100 mL 水溶解后,调节 pH 至 6.8,配制成 SIF 溶液。

将鱼油微胶囊样品依次置于现配的 SOS(0~10 min)、SGF(10~120 min)和 SIF(120~270 min)中,(37±1)℃下水浴并以 100 r/min 搅拌一定时间,模拟人体消化道的消化功能,测量不同时间下的芯材保留率。

1.2.6 微胶囊粒径变化 将体外模拟人体消化道试验过程中不同时间点的样品置于水中分散均匀后,用粒度仪测定样品粒径分布,并分析其变化。

1.2.7 数据处理 所有试验数据均为 3 次测定的平均值,采用 SPSS 18.0 软件对试验数据进行多重比较及差异显著性检验分析,利用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 贮藏温度对芯材保留率的影响

由图 1 可知,芯材保留率随贮藏时间的增加逐渐下降;同一时间下,贮藏温度越高,芯材保留率越低。4℃下贮藏 21 d 可达 93%的芯材保留率,而 50℃下贮藏 21 d 后,有大部分芯材被释放,保留率降至 58%,且显著低于 25、35℃下的($P<0.05$)。相同条件下,芯材保留率随贮藏时间的延长逐渐降低,是因为较高的温度下,壁材膨胀使其所形成的保护结构被破坏,囊膜孔径增大、通透性增强,甚至出现裂缝,对芯材的阻力变小,使芯材加速逸出和释放^[21-22];另一方面,高温环境能促使芯材分子加速运动,使其动能增大,加快芯材的释放速率^[23]。因此,高温会对芯材、壁材都造成影响,样品应尽量贮藏在温度较低的环境中。

由表 1 可知, $R^2>0.97$ 说明拟合性较好,可对其释放规律进行较好的解释^[24];释放机理参数 $n<1$,表明该释放过程介于扩散限制动力学与一级动力学之间; k 值随贮藏温度的增加而显著增加($P<0.05$)。综上可知,鱼油微胶囊的释放为非稳态的动力学过程,贮藏温度对鱼油微胶囊芯材保留率具有显著影响($P<0.05$),4℃下贮藏可以有效阻止或延缓其释放。

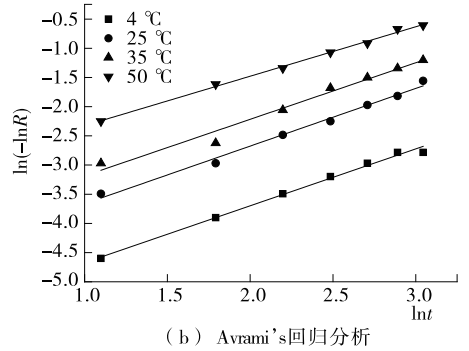
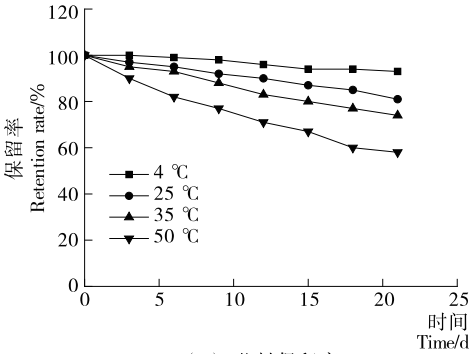


图 1 鱼油微胶囊在不同贮藏温度下的芯材保留率及 Avrami's 回归分析

Figure 1 Core material retention and Avrami's regression analysis of fish oil microcapsules at different storage temperatures

表 1 不同贮藏温度下的芯材释放机理参数及释放速率常数

贮藏温度/℃	释放机理参数 n	释放速率常数 k	R^2
4	0.974	3.04×10^{-3}	0.994
25	0.988	14.44×10^{-3}	0.985
35	0.968	13.72×10^{-3}	0.976
50	0.847	23.79×10^{-3}	0.996

2.2 相对湿度对芯材保留率的影响

由图 2 可知,芯材保留率随相对湿度和贮藏时间的增加而大幅下降,相对湿度 92%下贮藏 21 d 后,鱼油微胶囊芯材保留率仅为 47%,显著低于相对湿度 34%下的($P<0.05$)。

由表 2 可知, $R^2>0.97$ 说明拟合程度较好; k 值随相对湿度的增加而增加; $n>1$ (相对湿度 32%除外)说明该释放过程超过一级反应动力学参数。因此,当环境中相对湿度增加,水分子在使壁材发生吸水的同时,还可以通过微胶囊表面进入其内部,使膜渗透性、机械强度、致密度等下降,进一步加快芯材释放速度^[25],故贮藏环境应尽量保持低相对湿度。

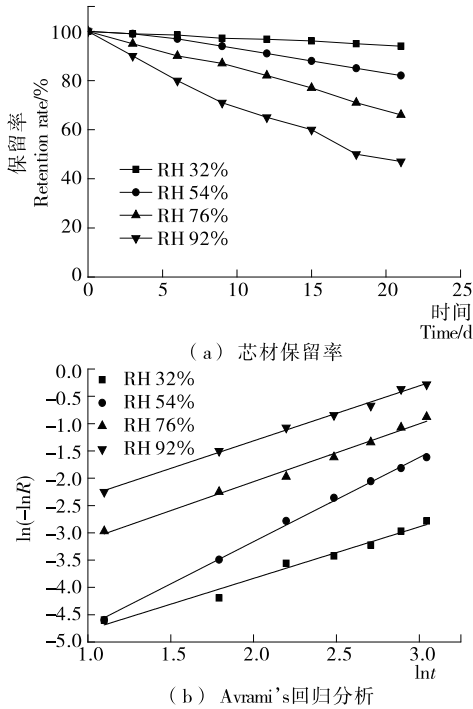


图 2 鱼油微胶囊在不同相对湿度下的芯材保留率和 Avrami's 回归分析

Figure 2 Core material retention and Avrami's regression analysis of fish oil microcapsules at different storage humidity

表 2 不同相对湿度下的芯材释放机理参数及释放速率常数

Table 2 Release mechanism parameters and release rate constants at different storage humidity

相对湿度/%	释放机理参数 n	释放速率常数 k	R^2
32	0.944	2.33×10^{-3}	0.979
54	1.544	17.43×10^{-3}	0.997
76	1.060	19.29×10^{-3}	0.991
92	1.008	36.65×10^{-3}	0.996

2.3 光照强度对芯材保留率的影响

由图 3 可知,芯材保留率随光照强度和贮藏时间的增加逐渐下降,说明光照强度可促使鱼油中游离基的产生,进一步发生自由基链反应^[26]。

由表 3 可知, $R^2 > 0.98$ 说明拟合程度较好; k 值随光照强度的增加逐渐增加; $n > 1$ 说明该释放过程超过一级反应动力学参数,故应尽量避光贮藏鱼油微胶囊。

2.4 体外模拟人体消化道环境对芯材释放的影响

由图 4 可知,样品在 SOS、SGF 和 SIF 模拟体外试验中表现出了良好的缓释及控制释放行为。0~10 min 为模拟口腔释放过程,其释放率仅为 4.7%,大部分进入下

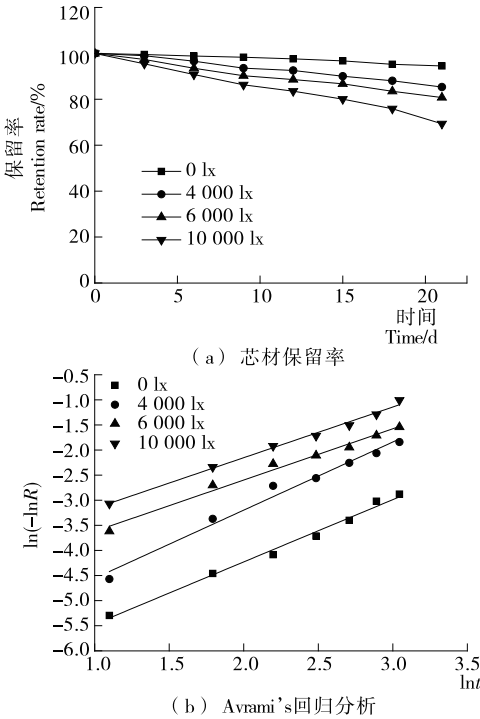


图 3 鱼油微胶囊在不同光照强度下的芯材保留率和 Avrami's 回归分析

Figure 3 Core material retention and Avrami's regression analysis of fish oil microcapsules at different light intensities

表 3 不同光照强度下的芯材放机理参数及释放速率常数

Table 3 Release mechanism parameters and release rate constants at different light intensities

光照强度/lx	释放机理参数 n	释放速率常数 k	R^2
0	1.240	4.47×10^{-3}	0.992
4 000	1.357	10.64×10^{-3}	0.983
6 000	1.022	12.83×10^{-3}	0.986
10 000	1.010	16.06×10^{-3}	0.993

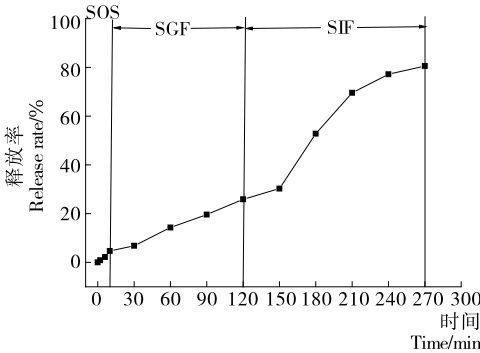


图 4 鱼油微胶囊在 SOS、SGF 及 SIF 中芯材的释放率

Figure 4 Release rate of core materials of fish oil microcapsules in SOS, SGF and SIF

一阶段中释放;10~120 min 在 SGF 的酸性环境中缓慢释放,120 min 时的释放率仅为 22.9%,可能是壳聚糖与大豆分离蛋白所形成的壁材具有较好的机械强度,模拟体外口腔消化液及胃液对壁材的消化能力有限,只有一部分多糖被消化,因此无法完全破坏壁材使芯材完全释放出来^[26-27]。120 min 后进入 SIF 溶液中,芯材释放率明显增加,270 min 时释放率达 80.6%,说明碱性环境的改变和胰蛋白酶的分解作用同时破坏了多糖和蛋白质之间的相互交联,打破了共价键,进一步溶解蛋白,使微胶囊骨架结构的致密度降低、快速降解,甚至在壁材表面出现一定的空隙,使芯材逐渐释放扩散^[28]。因此,大豆分离蛋白和壳聚糖复合壁材具有较强的抗消化能力,可以使微胶囊中的芯材在整个模拟体外消化道环境防止芯材立即释放,起到缓释作用^[29]。

2.5 体外模拟人体消化道环境中微胶囊粒径的变化

由图 5 可知,0~120 min,平均粒径由 15.82 μm 减小至 5.67 μm ,减少了 64%,而此时的芯材释放率仅为 22.9%;120~270 min 平均粒径减小至 2.98 μm 。当微胶囊在 SGF 溶液中时,虽然壁材在胃蛋白酶及酸性环境的作用下逐渐溶解,但整个结构仍然保持完整,芯材不能立即释放,起到缓释作用;而当微胶囊进入 SIF 溶液中时,由于环境的改变使得壁材结构快速瓦解,最终有 80.6%的芯材被释放。

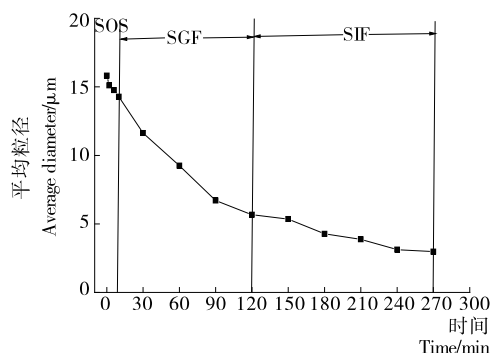


图 5 鱼油微胶囊在 SOS、SGF 及 SIF 环境中的平均粒径

Figure 5 Average diameter of fish oil microcapsules in SOS, SGF and SIF environments

3 结论

在前期研究的基础上,对通过复合壁材制备的鱼油微胶囊产品在不同贮藏温度、相对湿度和光照强度下芯材的释放性能进行测定,并采用 Avrami's 公式进行拟合,其中 $R^2 > 0.97$,说明拟合程度良好。通过分析释放机制参数和释放速率常数,明确了不同贮藏条件下的释放类型:当贮藏温度 4~50 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 34%时, $n < 1$,说明介于扩散限制动力学和一级释放动力学之间;当相对湿

度 54%~92%,光照强度 0~10 000 lx 时, $n > 1$,说明属于一级释放动力学。通过对模拟消化道中的释放情况进行研究发现,经 270 min 后,微胶囊释放率达 80.6%,表明微胶囊在模拟消化道中有缓释行为,而微胶囊相应的粒径从起始的 15.82 μm 经模拟消化道环境后减小至 2.98 μm ,表明该种微胶囊产品能够顺应人体肠道的消化吸收功能。体外模拟试验中对于壁材的耐酸性要求更高,后期可复配一些耐酸的物质达到更好的缓释效果。

参考文献

- [1] 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(1): e153-e154.
- [2] 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, 121(11): 1-12.
- [3] 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(1): 56-61.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] KRALOVEC J A, ZHANG S, ZHANG W, et al. A review of the progress in enzymatic concentration and microencapsulation of omega-3 rich oil from fish and microbial sources[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(2): 639-644.
- [7] GIBBS F, INTEAZ ALLI, CATHERINE N. Mulligan, Bernard, Encapsulation in the food industry: A review Bernard[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 1999, 50(3): 213-224.
- [8] 刘恺, 胡莉, 党奇峰, 等. 壳聚糖/阿拉伯胶复凝聚鱼油微胶囊的制备及性质研究[J]. *功能材料*, 2017, 48(8): 107-112.
- [9] VORA L, SITA V, VAVIA P. Zero order controlled release delivery of cholecalciferol from injectable biodegradable microsphere: In-vitro characterization and in-vivo pharmacokinetic studies [J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2017, 107(1): 78-86.
- [10] STITHIT S, CHEN W, PRICE J. Development and characterization of buoyant theophylline microspheres with near zero order release kinetics[J]. *Journal of Microencapsulation*, 1998, 15(6): 725-737.
- [11] WING M R. Apparent first-order kinetics in the transforma-

- tion of 1,1,1-trichloroethane in groundwater following a transient release[J]. *Chemosphere*, 1997, 34(4): 771-781.
- [12] TOBISZEWSKI M, NAMIESNIK J. Abiotic degradation of chlorinated ethanes and ethenes in water[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(6): 1 994-2 006.
- [13] JAIN A, JAIN S K. In vitro release kinetics model fitting of liposomes: An insight[J]. *Chemistry and physics of lipids*, 2016, 201(1): 28-40.
- [14] 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.
- [15] 翟爱华, 刘远洋, 张敬尧, 等. 油脂天然抗氧化剂微胶囊缓释动力学研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(2): 69-72, 76.
- [16] SOLOMON B, SAHLE F, GEBRE-MARIAM T, et al. Microencapsulation of citronella oil for mosquito-repellent application: Formulation and in vitro permeation studies[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2012, 80(1): 61-66.
- [17] 刘斯博, 田少君, 夏克东. 亚麻籽油微胶囊芯材的释放条件及模拟缓释行为研究[J]. *中国油脂*, 2016, 41(9): 31-35.
- [18] 高传忠, 刘成祥, 寇兴然, 等. 牡丹籽油微胶囊的释放动力学和氧化稳定性研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(7): 40-44.
- [19] GIORGIO L D, SALGADO P R, MAURI A N. Encapsulation of fish oil in soybean protein particles by emulsification and spray drying[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87(1): 891-901.
- [20] 刘晓丽, 魏长庆, 詹晓北, 等. 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[J]. *食品与机械*, 2019, 35(9): 1-9.
- [21] 张学鹏. 红花籽油微胶囊的制备、性质及其应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013: 45-51.
- [22] XIAO Zuo-bing, KANG Yan-xiang, HOU Wen-jing, et al. Microcapsules based on octenyl succinic anhydride (OSA)-modified starch and maltodextrins changing the composition and release property of rose essential oil[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137(1): 132-138.
- [23] 龙门, 冯超, 李永佳, 等. 缓释型茶树精油-壳聚糖微胶囊的制备、表征及体外释放规律[J]. *食品科学*, 2019, 40(16): 242-248.
- [24] 叶贤江, 曾恒, 蔡为荣, 等. 双歧杆菌混凝胶微囊制备及其胃肠释放特性研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(20): 1-12.
- [25] LI Zhan-feng, DU Xiao-yu, CUI Xue-jun, et al. Ultrasonic-assisted fabrication and release kinetics of two model redox-responsive magnetic microcapsules for hydrophobic drug delivery[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 57(1): 223-232.
- [26] 孟翔宇, 赵彦巧, 李钰琨, 等. 玫瑰茄花色苷微胶囊的制备及其稳定性与释放性的评价[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(14): 174-181.
- [27] CAN KARACA A, LOW N, NICKERSON M. Encapsulation of flaxseed oil using a benchtop spray dryer for legume protein-maltodextrin microcapsule preparation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(21): 5 148-5 155.
- [28] 杨小斌, 周爱梅, 王爽, 等. 蓝圆鲐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.
- [29] QIU Jia-huan, ZHENG Qun-xiong, FANG-Lei, et al. Preparation and characterization of casein-carrageenan conjugates and self-assembled microcapsules for encapsulation of red pigment from paprika[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 196(1): 322-331.

(上接第 22 页)

- [2] OGAWA Y, KUENSTING H, SUGIYAMA J, et al. Structure of a rice grain represented by a new three-dimensional visualisation technique[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002, 36(1): 1-7.
- [3] ZHONG Wei-feng, QIN Chao-qum, LIU Cheng-ji, et al. The edge detection of rice image based on mathematical morphology and wavelet packet [C]// Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference. Harbin: IEEE, 2012: 801-804.
- [4] 温维亮, 王勇健, 许童羽, 等. 基于三维点云的玉米果穗几何建模[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 88-93.
- [5] 黄霞, 郑顺义, 桂力, 等. 基于点云的谷粒高通量表型信息自动提取技术[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 257-264, 248.
- [6] 孔祥亮, 汤晓华, 吴星宇, 等. 激光扫描糙米三维可视化数字建模[J]. *食品与机械*, 2017, 33(6): 84-88.
- [7] HUGUES Hoppe, TONY De Rose, TOM Duchamp, et al. Surface reconstruction from unorganized points clouds[J]. *Siggraph Comput Graph*, 1992, 26(2): 71-78.
- [8] 刘开云. 基于 KD-Tree 的 KNN 沙尘孤立点监测算法的研究与应用[D]. 开封: 河南大学, 2018: 19-38.
- [9] 蔡天净, 唐瀚. Savitzky-Golay 平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. *数字通信*, 2011, 38(1): 63-68, 82.
- [10] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 348-376.
- [11] 张坤. 基于三维激光扫描的点云数据逆向重建算法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016: 73-78.
- [12] KAZHDAN M, BOLITHO M, HOPPE H. Poisson surface reconstruction[C]// Proceedings of 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing, June 26-28, 2006, Cagliari, Sardinia, Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2006: 61-70.