

青金桔籽油微胶囊的喷雾干燥技术制备工艺优化

李荣丽^{1,2,3}, 吴喆超^{1,2,3}, 肖安红^{1,2,3}, 张红建^{4,5}

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 湖北省农产品加工与转化重点实验室, 武汉 430023;
3. 大宗粮油精深加工教育部重点实验室, 武汉 430023; 4. 海南省粮油科学研究所, 海南 琼海 571400;
5. 海南青金桔食品科技有限公司, 海南 琼海 571400)

摘要:为有效保留青金桔籽油中营养活性成分及特殊风味物质, 并方便应用于食品中, 对采用喷雾干燥技术制备青金桔籽油微胶囊进行了研究。在筛选出的包埋效果及乳液稳定性均佳的大豆分离蛋白与麦芽糊精(质量比 1:1)为复合壁材基础上, 以包埋率为指标, 采用单因素实验和正交实验对青金桔籽油微胶囊的制备工艺条件进行优化, 并对微胶囊的性质进行表征。结果表明:最佳工艺条件为壁材水溶液质量浓度 19.23 g/mL、芯壁比 1:2.5、单甘酯与蔗糖酯按质量比 3:7 组成的乳化剂总添加量占乳液质量的 1.00%、喷雾干燥进风温度 180℃, 在此条件下包埋率为 84.33%; 制备的青金桔籽油微胶囊为均匀的球形纳米颗粒, 表面光滑且结构紧密, 包埋效果好, 水分含量为 2.47%, 平均粒径为 238.56 nm, 分散系数为 0.26, 休止角为 32.81°, 堆积密度为 0.33 g/mL。综上, 采用喷雾干燥技术可制备包埋效果和性质良好的青金桔籽油微胶囊。

关键词:青金桔籽油; 复合壁材; 喷雾干燥; 纳米囊; 包埋率; 性质

中图分类号: TS225.6; TS205 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)03-0084-06

Optimization of preparation of green kumquat seed oil microcapsules by spray drying technology

LI Rongli^{1,2,3}, WU Zhechao^{1,2,3}, XIAO Anhong^{1,2,3}, ZHANG Hongjian^{4,5}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Product, Wuhan 430023, China;
3. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education, Wuhan 430023, China;
4. Hainan Institute of Grain and Oil Science, Qionghai 571400, Hainan, China;
5. Hainan Green Kumquat Food Technology Co., Ltd., Qionghai 571400, Hainan, China)

Abstract: In order to effectively retain the nutritional activity components and special flavor substances in green kumquat seed oil, and to facilitate its application in food, spray drying technology was used to prepare green kumquat seed oil microcapsules. Based on the screening of soybean isolate protein and maltodextrin (mass ratio 1:1) as the composite wall material with good embedding effect and emulsion stability, single-factor experiment and orthogonal experiment were used to optimize the preparation process conditions of green kumquat seed oil microcapsules using the embedding rate as the index, and the properties of the microcapsules were characterized. The results showed that the optimal preparation conditions were obtained as follows: mass concentration of aqueous solution of wall material 19.23 g/mL, ratio of core material to wall material 1:2.5, total amount of emulsifier composed of monoglyceride and

sucrose ester with mass ratio of 3:7 1.00% (based on the mass of emulsion) and spray drying inlet air temperature 180℃. Under the optimal conditions, the embedding rate reached 84.33%. The prepared green kumquat seed oil microcapsules were uniform spherical nanoparticles with smooth

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-12-09

基金项目: 海南省属科研院所技术创新专项(jscx202034)

作者简介: 李荣丽(1993), 女, 硕士研究生, 研究方向为谷物资源加工与利用(E-mail)1065153546@qq.com。

通信作者: 肖安红, 教授(E-mail)1090106395@qq.com。

surface, compact structure and good embedding effect, and its moisture content was 2.47%, the average particle size was 238.56 nm, the dispersion coefficient was 0.26, the repose angle was 32.81°, and bulk density was 0.33 g/mL. In conclusion, the green kumquat seed oil microcapsules with good encapsulation efficiency and properties can be prepared by spray drying technology.

Key words: green kumquat seed oil; composite wall material; spray drying; nanocapsules; embedding rate; property

青金桔是芸香科柑橘族金柑属,又名绿桔、公孙桔、山桔等^[1],主要分布在中国海南、中国台湾及东南亚地区。据统计,目前我国海南省青金桔年产量在20万t左右^[2],且其产量在逐年增加。每年海南省青金桔榨汁后可得青金桔籽2.3万t左右,但由于缺乏相应的加工技术,这些籽基本随果渣一并被丢弃,不仅造成资源的极大浪费,而且污染环境。青金桔籽中油脂含量为35%左右,油脂中不饱和脂肪酸含量达到73%以上,并富含维生素、类胡萝卜素、黄酮类化合物等活性营养物质^[3-5],具有抗氧化,抑菌,降低血糖、血清甘油三酯、胆固醇,提高血清中高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)的功效。青金桔籽油含有特殊的香气,主要挥发性风味物质为2-(甲氨基)苯甲酸甲酯、柠檬烯、糠醛和5-甲基糠醛^[2],用于制作食品可以增加食品的营养和风味。但青金桔籽油中不饱和脂肪酸及活性物质不稳定,风味物质易散发,影响其在食品中的应用效果。

研究表明,微胶囊包埋技术有利于控制油脂的挥发,可以改善油脂的水溶性、化学稳定性和释放特性,并保持其生物活性,也方便添加到其他食品制作原料中^[6]。目前制备微胶囊的方法有喷雾干燥法、真空冷冻干燥法、分子包埋法和复凝聚法等,其中喷雾干燥法具有生产效率高、经济成本低、操作流程简单等特点,应用最为广泛。另外,微胶囊制备过程中更趋向于以复合壁材代替单一壁材包埋芯材,以改善单一壁材包埋过程中存在的问题。如:李一喆^[6]以阿拉伯胶和麦芽糊精为复合壁材包埋橘皮油,在进风温度194℃、进料速度90.2 mL/min和固形物含量34.7%的条件下,制得包埋率为90.17%、手感细腻、囊壁致密、较规则的球形微胶囊;贾有青等^[7]以 β -环糊精与大豆分离蛋白为复合壁材,采用喷雾干燥法包埋元宝枫籽油,在壁材与芯材质量比4:1、 β -环糊精与大豆分离蛋白质量比4:1、壁材质量与水体积比1:7、进风温度170℃的条件下,制得包埋率为75.32%,囊壁完整无裂痕且具有良好的稳定性的微胶囊。

青金桔籽作为一种待开发的油料资源,有关如

何保留青金桔籽油营养成分的活性及特殊风味物质的研究也是资源开发的一个重要方面。为此,本文选择复合壁材对青金桔籽油进行包埋,采用喷雾干燥技术制备青金桔籽油微胶囊,对其制备条件及微胶囊的性质进行了研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

青金桔籽油,实验室自制;大豆分离蛋白,谷神生物科技集团有限公司;麦芽糊精,杭州科田生物技术有限公司;辛烯基琥珀酸淀粉钠,恒锐食品生物技术有限公司;蔗糖酯(HLB 13),格富食品科技股份有限公司;食品级单甘酯(HLB 3~4),佳力士添加剂有限公司;正己烷、乙醚、石油醚、乙醇、氨水等,均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

FK-FSH-2A高速分散搅拌机,方科仪器(常州)有限公司;LNB-9000Y型小型喷雾干燥机,上海皓庄仪器有限公司;TESCAN MIRA场发射扫描电镜,泰思肯(中国)有限公司;马尔文3000激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;高压均质机,安拓思纳米技术(苏州)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 青金桔籽油微胶囊的制备

将复合壁材按质量比1:1溶于蒸馏水中配制成水溶液,于4℃静置12h后,加入一定量蔗糖酯,于70℃水浴溶解,得水相。将一定量单甘酯溶于青金桔籽油中并在60℃搅拌4min得油相。将水相缓慢加入到油相中,于50℃水浴搅拌10min,以10000 r/min高速剪切4min后,30 MPa高压均质2次,得到乳液。将乳液在13 mL/min进料速度、一定的进风温度下进行喷雾干燥,得青金桔籽油微胶囊。

1.2.2 青金桔籽油微胶囊包埋率的测定

1.2.2.1 微胶囊表面油的提取

参考文献[8],称取1g青金桔籽油微胶囊样品(质量记为 m_1),加入20 mL正己烷轻微振荡浸提1min,过滤。再重复浸提1次后,合并浸提液,旋蒸除

去正己烷,105 ℃干燥至恒重,收集油脂即为表面油(质量记为 m_2)。

1.2.2.2 微胶囊总油的提取

参考 GB 5009.6—2016 中脂肪的测定方法,称取 1 g 青金桔籽油微胶囊(质量记为 m_3),搅拌溶于 30 mL 60 ℃蒸馏水中。冷却后加入 1.25 mL 质量分数为 25% 的氨水振摇 3 min,再依次加入 10 mL 无水乙醇、20 mL 石油醚和 20 mL 乙醚,充分振摇 1 min 萃取其中的油脂,取上清液。再重复萃取 1 次,合并萃取液,旋蒸除去溶剂,105 ℃干燥至恒重,收集油脂即为总油(质量记为 m_4)。

按式(1)计算包埋率(Y)。

$$Y = \left(1 - \frac{m_2 m_3}{m_1 m_4}\right) \times 100\% \quad (1)$$

1.2.3 乳液稳定性的测定

移取 10 mL 乳液于 10 mL 有刻度的试管中,于 70 ℃水浴中放置 8 h,读取乳液总高度(H_1)和游离层高度(H_2),按式(2)计算乳液稳定性(S_E)。

$$S_E = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (2)$$

1.2.4 微胶囊性质的表征

1.2.4.1 水分含量的测定

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》方法测定水分含量。

1.2.4.2 溶解度的测定

参考徐清云等^[9]的方法,称取水分含量为 B 的青金桔籽油微胶囊样品 2 g(m_1)溶于 100 mL 蒸馏水中,以 4 000 r/min 离心 10 min,取沉淀再加入 100 mL 蒸馏水溶解后再次离心,收集沉淀物,105 ℃干燥至恒重,得沉淀物(质量记为 m_2)。按式(3)计算溶解度(S)。

$$S = \left[1 - \frac{m_2}{(1 - B) \times m_1}\right] \times 100\% \quad (3)$$

1.2.4.3 流动性的测定

将 2 g 青金桔籽油微胶囊样品置于距圆盘高 5 cm、口径为 65 mm 的漏斗中让其自由下落于圆盘上,测量在圆盘中锥体的高度(H)及半径(R),按式(4)计算休止角(θ)。

$$\theta = \arctan(H/R) \quad (4)$$

1.2.4.4 冲调性的测定

称取 2 g 青金桔籽油微胶囊样品溶于 100 mL 70 ℃蒸馏水中,轻摇即充分溶解则为冲调性优良,轻微搅拌后大部分溶解、无明显结块为较好,搅拌后不溶解并有结块为较差。

1.2.4.5 堆积密度的测定

称取 2 g(m)青金桔籽油微胶囊样品,缓慢装入

有刻度的量筒中,轻微晃动使粉末自然下沉,测定体积(V)。按式(5)计算堆积密度(ρ)。

$$\rho = m/V \quad (5)$$

1.2.4.6 粒径分析

将 0.1 g 青金桔籽油微胶囊样品溶解于 100 mL 蒸馏水中,并取 0.1 mL 稀释 100 倍后,取 1 mL 使用激光粒度仪测定其平均粒径及其分布,以及分散系数(PDI)。

1.2.4.7 扫描电镜分析

将青金桔籽油微胶囊样品粘贴于导电胶的一面,导电胶另一面固定在样品台上,喷金后使用扫描电镜观察样品形貌。

1.2.5 数据分析

所有实验结果数据采用“平均值 ± 标准差”表示,作图采用 Origin 9.0 软件。

2 结果与讨论

2.1 复合壁材的选择

分别用大豆分离蛋白 + 麦芽糊精、大豆分离蛋白 + 辛烯基琥珀酸淀粉钠和麦芽糊精 + 辛烯基琥珀酸淀粉钠为复合壁材,青金桔籽油为芯材,在壁材质量比 1:1、壁材水溶液质量浓度 15.14 g/mL、芯壁比 1:2、单甘酯与蔗糖酯质量比 3:7,乳化剂总添加量 1.00% (占乳液质量)、进风温度 180 ℃的条件下,按 1.2.1 的方法制备青金桔籽油微胶囊,测定乳液稳定性和微胶囊包埋率,结果见表 1。

表 1 3 种复合壁材包埋实验结果

指标	大豆分离蛋白 + 麦芽糊精	大豆分离蛋白 + 辛烯基琥珀酸淀粉钠	麦芽糊精 + 辛烯基琥珀酸淀粉钠
稳定性/%	98.98 ± 0.11	98.09 ± 0.25	95.14 ± 0.23
包埋率/%	66.74 ± 0.57	41.89 ± 0.28	52.04 ± 0.94

由表 1 可知,3 种乳液的稳定性均良好,但包埋率差别较大。大豆分离蛋白与麦芽糊精复合包埋率最高,为 66.74%。这是因为大豆分离蛋白分子结构具有亲水亲油特性,能降低水和油的表面张力,稳定油滴,防止聚集,形成均一乳状液^[10],同时其具有良好的成膜性和阻氧性。麦芽糊精具有很好的溶解性,但乳化性比较弱。与大豆分离蛋白复配时,由于大豆分离蛋白的疏水性侧链伸展到油相,麦芽糊精的亲水性侧链伸展到水相,多糖分子的结构使得空间位阻作用增强,有效抑制乳液液滴间的聚集和絮凝,促进蛋白质分子紧密地吸附在油水界面上,提高乳液稳定性,从而使包埋率提高^[11]。辛烯基琥珀酸淀粉钠常用作乳化增稠剂^[12],与麦芽糊精复配时,由于乳化性不够,乳液液滴之间絮凝,包埋率较低。辛

烯基琥珀酸淀粉钠和大豆分离蛋白作为复合壁材时,乳液相对稳定,但黏度相对较大不利于乳化,蛋白质分子发生聚集,流动性差,包埋效果不好。因此,选择大豆分离蛋白与麦芽糊精为复合壁材进行包埋实验。

2.2 单因素实验

在基础条件为单甘酯与蔗糖酯质量比 3:7、乳化剂总添加量 1.00% (占乳液质量)、芯壁比 1:2.5、壁材水溶液质量浓度 15.14 g/mL、进风温度 180 °C 下,通过单因素实验分别考察乳化剂总添加量、芯壁比、壁材水溶液质量浓度和进风温度对青金桔籽油微胶囊包埋率的影响,结果见图 1~图 4。

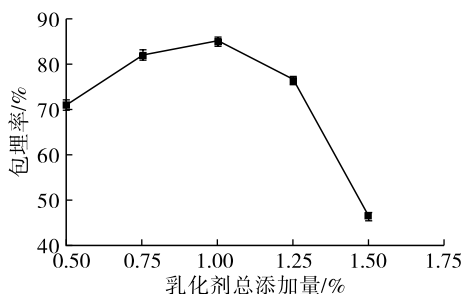


图 1 乳化剂总添加量对包埋率的影响

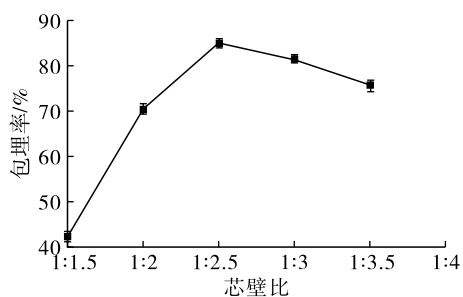


图 2 芯壁比对包埋率的影响

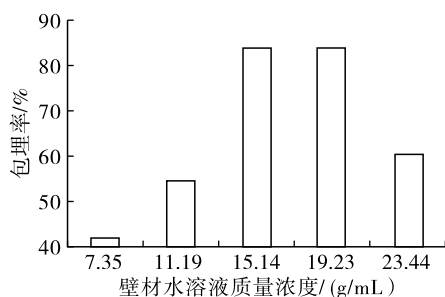


图 3 壁材水溶液质量浓度对包埋率的影响

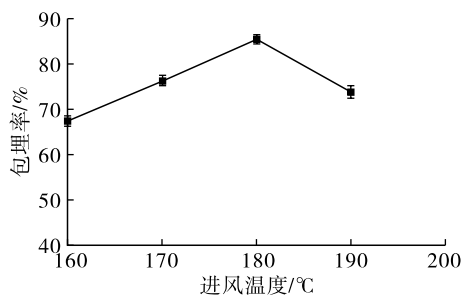


图 4 进风温度对包埋率的影响

从图 1 可见,随着乳化剂总添加量的增加,包埋率升高至最高点后开始下降。当乳化剂总添加量为 1.00% 时,包埋率最高。乳化剂用量过少,不能很好地完成乳化,部分油相芯材没有被包埋;乳化剂用量过多,会使乳液发生聚结,对油水界面张力作用力下降^[13],不利于壁材与芯材的结合,导致包埋率下降。

从图 2 可见,随着芯壁比的增加,包埋率呈先增大后降低的趋势,当芯壁比为 1:2.5 时包埋率最高。当芯壁比较低时,壁材含量过多使乳液黏度过高,喷雾干燥时难以形成良好雾化颗粒并迅速气化形成囊壁空洞以包埋芯材,使得芯材吸附在微胶囊表面,包埋率降低^[14]。当芯壁比过高时,较少的壁材无法将芯材完全包埋,导致包埋率降低。

从图 3 可见,随着壁材水溶液质量浓度的增大,包埋率先增大后降低,当壁材水溶液质量浓度为 15.14 g/mL 时包埋率最高。壁材水溶液质量浓度较小时,流动性好,利于形成雾状颗粒,但过多地蒸发出水分,气体释出,破坏壁材所形成的囊壁空洞;壁材水溶液质量浓度过大时,乳状液黏度变大,流动性差,喷雾干燥时影响颗粒形成,且颗粒膜增厚,水分蒸发阻力增大且难以均匀。可见壁材水溶液质量浓度过小或过大均造成包埋率下降。

从图 4 可见,随进风温度升高,包埋率先升高后降低,在进风温度为 180 °C 时包埋率最大。当进风温度低于 180 °C 时,传热量不足使水分蒸发速率不够,无法形成完整的微胶囊,导致包埋率降低,另外形成的颗粒易粘在一起黏附在喷雾干燥器的壁上,甚至堵塞喷嘴,造成喷雾干燥效率下降;进风温度高于 180 °C 时,颗粒空囊内水分蒸发过快,易破裂,导致包埋率下降。

2.3 正交实验

基于单因素实验结果,以包埋率为指标,以乳化剂总添加量(A)、芯壁比(B)、壁材水溶液质量浓度(C)和进风温度(D)为因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交实验对青金桔籽油微胶囊制备工艺条件进行优化。青金桔籽油微胶囊制备的正交实验因素水平见表 2,正交实验设计及结果见表 3。

表 2 正交实验因素水平

水平	乳化剂总添加量/%	芯壁比	壁材水溶液质量浓度/(g/mL)	进风温度/°C
1	0.75	1:2	11.19	170
2	1.00	1:2.5	15.14	180
3	1.25	1:3	19.23	190

表3 正交实验设计及结果

实验号	A	B	C	D	包埋率/%
1	1	1	1	1	49.71
2	1	2	2	2	82.71
3	1	3	3	3	70.44
4	2	1	2	3	68.51
5	2	2	3	1	79.55
6	2	3	1	2	56.77
7	3	1	3	2	71.33
8	3	2	1	3	52.78
9	3	3	2	1	67.55
k_1	67.62	63.18	53.09	65.60	
k_2	68.28	71.68	72.92	70.27	
k_3	63.89	64.92	73.77	63.91	
R	4.39	8.50	20.69	6.36	

从表3可看出:4个因素对青金桔籽微胶囊包埋率影响的主次顺序为壁材水溶液质量浓度 > 芯壁比 > 进风温度 > 乳化剂总添加量;根据 k 值判断 $A_2B_2C_3D_2$ 为最佳条件,即乳化剂总添加量1.00%、芯壁比1:2.5、壁材水溶液质量浓度19.23 g/mL、进风温度180℃。经验证实验,最佳条件下包埋率为84.33%。

2.4 青金桔籽油微胶囊的性质

将最佳工艺条件下制备的青金桔籽油微胶囊进行性质表征。青金桔籽油微胶囊的性质指标见表4,粒径分布如图5所示,扫描电镜结果如图6所示。

表4 青金桔籽油微胶囊的性质指标

指标	结果
水分含量/%	2.47 ± 0.15
堆积密度/(g/mL)	0.33 ± 0.03
休止角/(°)	32.81 ± 0.32
冲调性	较好
溶解度/%	81.43 ± 0.78

从表4可知,青金桔籽油微胶囊的水分含量为2.47%,水分含量低,说明在喷雾过程得到充分干燥,利于保存。青金桔籽油微胶囊的堆积密度为0.33 g/mL,较小的堆积密度也说明青金桔籽油微胶囊颗粒大小均匀,且颗粒间隙较小,可减少其中的含氧量以减缓氧化。休止角越小流动性越好,一般休止角小于30°流动性强,45°~60°为一般,大于60°为差^[15]。青金桔籽油微胶囊的休止角为32.81°,说明其流动性较强。青金桔籽油微胶囊冲调性较好,轻微搅拌后大部分能溶解于蒸馏水且无明显结块,并具有良好的溶解性,其溶解度为81.43%。

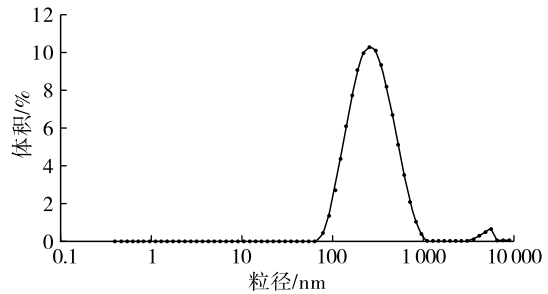


图5 青金桔籽油微胶囊粒径分布

从图5可知,青金桔籽油微胶囊的粒径主要分布在100~1 000 nm范围内,呈正态分布,平均粒径在238.56 nm,为纳米胶囊,PDI较小,为0.26。粒径越小,制备的微胶囊稳定性更好^[16],营养物质更易被消化吸收。PDI值较小说明青金桔籽油微胶囊粒径大小均匀,分布较为集中^[17]。

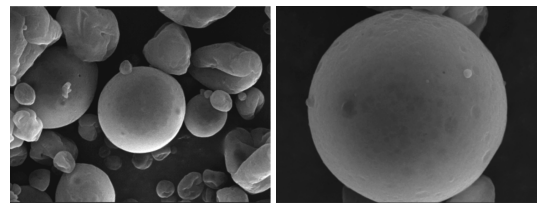


图6 青金桔籽油微胶囊扫描电镜图

从图6可见:青金桔籽油微胶囊颗粒为球形,大小比较均匀,表面光滑、致密,无裂痕;有些颗粒表面存在褶皱,可能是在雾化过程中液滴擦碰或干燥过程中水分蒸发瞬间的粘连所致^[18]。

3 结论

采用喷雾干燥技术制备青金桔籽油微胶囊的最佳工艺条件为大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比1:1为复合壁材、芯壁比1:2.5、壁材水溶液质量浓度19.23 g/mL、乳化剂(单甘酯与蔗糖酯质量比3:7)总添加量1.00%、进风温度180℃,在此条件下包埋率为84.33%。

制备的青金桔籽油微胶囊颗粒为球形,结构完整无破损,平均粒径为238.56 nm,PDI为0.26,水分含量为2.47%,堆积密度为0.33 g/mL,休止角为32.81°,溶解度为81.43%,具有良好流动性、溶解性和冲调性。

参考文献:

- [1] NISPEROS - CARRIEDO M O, BALDWIN E A, MOSHONAS M G, et al. Determination of volatile flavor components, sugars, and ascorbic, dehydroascorbic, and other organic acids in calamondin (*Citrus mitis* Blanco) [J]. J Agric Food Chem, 1993, 40(12):2464 - 2466.
- [2] 张红建,梁爱文,王青松,等. 青金桔籽油螺旋压榨工艺及其理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(12):

- 56-63,71.
- [3] MANAF Y N, OSMAN A, LAI O M, et al. Characterisation of musk lime (*Citrus microcarpa*) seed oil[J]. J Sci Food Agric, 2010, 88(4):676-683.
- [4] 刘欣,马金爽,张晓青,等. 基于近红外技术快速检测青金桔果粉中 β -胡萝卜素含量[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2018, 31(3):264-269.
- [5] CHEONG M W, CHONG Z S, LIU S Q, et al. Characterisation of calamansi (*Citrus microcarpa*). Part I: volatiles, aromatic profiles and phenolic acids in the peel [J]. Food Chem, 2012, 134(2):686-695.
- [6] 李一喆. 橘皮油微胶囊制备及其理化性质研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学,2020.
- [7] 贾有青,李哲,代岚,等. 元宝枫籽油微胶囊化及其稳定性研究[J]. 中国粮油学报,2022,37(4):141-146.
- [8] 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.
- [9] 徐清云,潘南,陈丽娇,等. 紫海胆黄油微胶囊制备工艺的研究[J]. 渔业现代化, 2018, 45(2):73-80.
- [10] SCHMITT C, TURGEON S L. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems [J]. Adv Colloid Interfac, 2011, 167(1/2):63-70.
- [11] 张亚婷. 大豆蛋白酶解/糖基化接枝复合改性制备微胶囊壁材的研究[D]. 江苏无锡:江南大学,2015.
- [12] 黄强,杨连生,罗发兴,等. 高粘度十二烯基琥珀酸淀粉钠理化性质的研究(I):糊的性质[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2001(12):42-45.
- [13] 孙羽. 喷雾干燥制备棕榈油微胶囊的研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学,2018.
- [14] 苗欣月,朱立斌,朱丹,等. 糜子壳油微胶囊工艺优化及其理化特性分析[J]. 中国粮油学报,2022,37(5):136-143.
- [15] TORINI L, ARGILLIER J F, ZYDOWICZ N. Interfacial polycondensation encapsulation in miniemulsion [J]. Macromolecules, 2005, 38(8):995-1004.
- [16] JIANG J, ZHU B, LIU Y, et al. Interfacial structural role of pH-shifting processed pea protein in the oxidative stability of oil/water emulsions[J]. J Agric Food Chem, 2014,67(7):1683-1691.
- [17] 常馨月. 奇亚籽油微胶囊的制备及其性质研究[D]. 重庆:西南大学,2021.
- [18] 盖旭,李荣,姜子涛. 以大豆分离蛋白为壁材喷雾干燥法制备芥末油微胶囊[J]. 中国调味品,2012,37(3):72-75.
- [19] 徐敏,武爱群. 超声波协同双酶复合酶解米渣蛋白制备ACE抑制肽工艺研究[J]. 粮食与饲料工业,2019(1):1-7.
- [20] 杨攀,李玲,黄丽,等. 水牛乳酶解液ACE抑制率及其稳定性研究[J]. 食品工业,2016,37(12):109-111.
- [21] 丁青芝,马海乐,骆琳,等. 超声处理对菜籽蛋白酶解效果的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1):294-299.
- [22] 吴月. 枸杞籽粕ACE抑制肽的筛选鉴定及作用机理研究[D]. 银川:宁夏大学,2022.
- [23] 汤海霞,张艳,葛武鹏,等. 酶解法制备绵羊乳酪蛋白ACE抑制肽的工艺优化及其抑制机制[J]. 中国食品学报,2022,22(6):220-231.

(上接第51页)