

## 木姜子精油微胶囊制备工艺优化及其品质分析

张丽红, 黄 梦, 王桂瑛, 尹晓燕, 杨子江, 田 梅, 廖国周, 葛长荣

### Preparation Process Optimization and Quality Analysis of *Litsea pungens* Hemsl Essential Oil Microcapsules

ZHANG Lihong, HUANG Meng, WANG Guiying, YIN Xiaoyan, YANG Zijiang, TIAN Mei, LIAO Guozhou, and GE Changrong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040232>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 真空冷冻干燥南美白对虾干燥模型及品质研究

Drying Model and Quality of *Litopenaeus vannamei* under Vacuum Freeze Drying

食品工业科技. 2019, 40(8): 79-84,144

#### 沙枣花精油微胶囊制备工艺优化及缓释性能

Optimization of Microencapsulation Preparation Process and Controlled-release Properties of *Elaeagnus angustifolia* Flowers Essential Oil

食品工业科技. 2018, 39(15): 158-164

#### 响应面优化菠萝蜜果粉真空冷冻干燥工艺

Optimization of vacuum freeze-drying of jackfruit powder by response surface methodology

食品工业科技. 2018, 39(12): 177-184

#### 基于低场核磁的紫薯片真空冷冻干燥过程中水分变化

Water Changes of Purple Sweet Potato Slices Using Low-field NMR during Vacuum Freeze Drying

食品工业科技. 2021, 42(7): 9-14

#### 基于低共熔溶剂法超声辅助蒸馏提取胡椒叶精油的工艺优化及其GC-MS分析

Optimization and GC-MS Analysis of Extracting Pepper Leaves Essential Oil by Ultrasonic Assisted Distillation Based on Deep Eutectic Solvents

食品工业科技. 2020, 41(20): 135-141

#### 青柠果皮精油蒸馏工艺优化及香气成分分析

Optimization of Distillation Process of *Citrus aurantiifolia* Peel Essential Oil and Analysis of Aroma Components

食品工业科技. 2019, 40(20): 196-200,208



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张丽红, 黄梦, 王桂瑛, 等. 木姜子精油微胶囊制备工艺优化及其品质分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 157-165. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040232

ZHANG Lihong, HUANG Meng, WANG Guiying, et al. Preparation Process Optimization and Quality Analysis of *Litsea pungens* Hemsl Essential Oil Microcapsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 157-165. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040232

# 木姜子精油微胶囊制备工艺优化 及其品质分析

张丽红<sup>1,2</sup>, 黄梦<sup>1,2</sup>, 王桂瑛<sup>1,\*</sup>, 尹晓燕<sup>1,2</sup>, 杨子江<sup>1,2</sup>, 田梅<sup>1,2</sup>, 廖国周<sup>2,\*</sup>, 葛长荣<sup>2</sup>

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 云南昆明 650201;

2. 云南农业大学, 云南省畜产品加工工程技术研究中心, 云南昆明 650201)

**摘要:**以木姜子精油为主要原料, 采用真空冷冻干燥法制备木姜子精油微胶囊, 并以包埋率为指标, 在单因素实验基础上结合正交试验, 进行木姜子精油微胶囊包埋工艺的优化, 以确定最佳工艺参数。同时进行木姜子精油微胶囊的质量评定, 分析其理化性质、微观结构、及在储藏过程中精油的挥发率及过氧化值。结果表明, 木姜子精油微胶囊包埋的最佳工艺参数为: 复合壁材比(大豆分离蛋白:  $\beta$ -环糊精)为 1:1 (g/g)、芯壁材比 1:5 (g/g)、固形物含量 15%、乳化剂含量 3%、乳化剂配比 1:4 (g/g)、乳化温度 40 °C, 在此条件下制备出的木姜子精油微胶囊包埋率可达 84.68%, 水分含量、溶解度及堆积密度分别为 3.05%、91.04% 和 0.35 g/cm<sup>3</sup>。扫描电子显微镜结果显示, 木姜子精油微胶囊呈不规则块状。随着储藏时间的延长, 木姜子精油微胶囊的挥发率和过氧化值均低于木姜子精油, 表明木姜子精油通过微胶囊化, 能够有效减缓精油的挥发速度, 降低精油氧化程度。

**关键词:**木姜子, 精油, 微胶囊包埋, 品质分析, 真空冷冻干燥

中图分类号: S573

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)02-0157-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040232



本文网刊:

## Preparation Process Optimization and Quality Analysis of *Litsea pungens* Hemsl Essential Oil Microcapsules

ZHANG Lihong<sup>1,2</sup>, HUANG Meng<sup>1,2</sup>, WANG Guiying<sup>1,\*</sup>, YIN Xiaoyan<sup>1,2</sup>, YANG Zijiang<sup>1,2</sup>, TIAN Mei<sup>1,2</sup>, LIAO Guozhou<sup>2,\*</sup>, GE Changrong<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Livestock Product Processing and Engineering Technology Research Center of Yunnan Province, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The essential oil of *Litsea pungens* Hemsl was used as the main raw material, and the method of vacuum freeze-drying was used to prepare the microcapsules of essential oil of *Litsea pungens* Hemsl, and the embedding rate of the microcapsules was used as an index. Optimizing the microcapsule embedding process of essential oils to determine the best process parameters. At the same time, the physical and chemical properties, microstructure, volatile rate and peroxide value of essential oil were analyzed during storage. The results showed that the best parameters of the microcapsules of essential oil were as follows: Composite wall material ratio (soy protein isolate:  $\beta$ -cyclodextrin) was 1:1 (g/g), core wall material ratio was 1:5 (g/g), solid content was 15%, emulsifier content was 3%, emulsifier ratio was 1:4 (g/g), emulsifying temperature was 40 °C, embedding rate of the microcapsules was 84.68%, its water content, solubility and bulk density were 3.05%, 91.04% and 0.35 g/cm<sup>3</sup>, respectively. The results of SEM showed that the microcapsules of *Litsea pungens* Hemsl essential oil were irregular in shape. With the extension of storage time, the volatilization rate and peroxide value of microcapsules of *Litsea pungens* Hemsl essential oil were lower than those of essential oil, which indicated that the

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 云南省科技计划项目重大科技专项(2019ZG003); 云南省科技计划项目国际科技合作专项(2018IA101)。

作者简介: 张丽红(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: zlh9582@163.com。

\* 通信作者: 王桂瑛(1979-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品加工与质量控制, E-mail: ynkmgwy@ynau.edu.cn。

廖国周(1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: liaoguozhou@ynau.edu.cn。

microencapsulation of *Litsea pungens* Hemsl essential oil could effectively slow down the volatilization rate and reduce oxidation degree of essential oil.

**Key words:** *Litsea pungens* Hemsl; essential oil; microencapsulation; quality analysis; vacuum freeze drying

木姜子(*Litsea pungens* Hemsl.)又名山鸡椒、山苍子、荜茄澄和山胡椒等<sup>[1]</sup>,属于被子植物门樟科木姜子属,在我国木姜子的产地分布广泛<sup>[2]</sup>,是我国特有的木本油料植物之一。木姜子有着极高的医用价值,人们常将干燥后的果实作为药材使用<sup>[3]</sup>。木姜子精油是一种具有活性的木姜子次级代谢产物<sup>[4]</sup>,为淡黄色半透明油状液体,香味与柠檬油相似<sup>[5]</sup>。柠檬醛<sup>[6]</sup>、柠檬烯<sup>[7]</sup>等作为木姜子精油中的主要成分,可用于调配、合成香料及制药工业,为维生素 C、维生素 E 等合成提供原料<sup>[8]</sup>,同时还具有良好的抗氧化活性和显著的抑菌作用<sup>[9]</sup>,在医药<sup>[10-11]</sup>、农业<sup>[12]</sup>、食品<sup>[13]</sup>等方面都具有重要的研究价值。然而木姜子精油易受到外界环境中光、水分、空气和高温等的影响,发生降解、蒸发或氧化变质,从而限制木姜子精油的应用。

微胶囊技术是一种保护技术,涉及领域较广,通过微胶囊化,将不稳定的气体、半固体、液体产品转变为稳定的固体,方便储藏和携带<sup>[14-15]</sup>。目前制备微胶囊常用的方法有:喷雾干燥法和真空冷冻干燥法等。冷冻干燥法加工温度较为温和,并在无氧条件下操作,适用于敏感和昂贵的生物活性化合物,能够保护活性成分不被破坏<sup>[16]</sup>。Charles 等<sup>[17]</sup>以竹芋淀粉和麦芽糊精为壁材,采用冷冻干燥法制备的金枪鱼鱼油微胶囊,能够提高货架期,并有良好的氧化稳定性。常馨月等<sup>[18]</sup>以酪蛋白酸钠与 D-乳糖-为壁材,采用冷冻干燥法制备奇亚籽油微胶囊,包埋率达 90.65%,且热稳定性良好。虽然木姜子精油的抗氧化性、抗菌性等的研究已有报道,但鲜见针对木姜子精油微胶囊化及品质进行深入分析的报道。

基于此,本实验以木姜子精油为对象,通过真空冷冻干燥法制备木姜子精油微胶囊,并以微胶囊包埋率为指标,在单因素的基础上结合正交试验,对木姜子精油的微胶囊包埋工艺进行优化,同时分析木姜子精油微胶囊的理化性质、微观结构及在储藏过程中精油的挥发率和过氧化值,旨在改变木姜子精油易挥发、易氧化变质的缺点,提高其稳定性,为木姜子精油应用前景的拓展提供一定的理论支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与仪器

木姜子精油 云南省畜产品加工工程技术研究中心提供;三氯甲烷、冰乙酸、硫代硫酸钠、碘化钾分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;乙醚、石油醚 分析纯,成都市科隆化学品有限公司;大豆分离蛋白 食品级,瑞康生物科技有限公司; $\beta$ -环糊精、阿拉伯胶 食品级,河南圣德实业有限公司;蔗糖脂肪酸酯(以下简称蔗糖酯)、单硬脂酸甘油

酯(以下简称单甘酯) 食品级,上海伊凡尔精细化工有限公司。

XMTD-4000 电热恒温水浴锅 北京永光明医疗仪器厂;101-2AB 电热鼓风干燥器 北京中心伟业仪器有限公司;DHG-9070A 烘箱 上海-恒科学仪器有限公司;H1650-W 离心机 湖南湘仪试验仪器有限公司;LGJ-10N 真空冷冻干燥机 北京亚星仪科发展有限公司;Sigma300 扫描电子显微镜 卡尔蔡司(上海)管理有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 木姜子精油微胶囊的工艺优化

##### 1.2.1.1 工艺流程 壁材+芯材→乳化→均质→真空冷冻干燥→木姜子精油微胶囊

参考王月月等<sup>[19]</sup>的方法并做修改:按照配方要求的质量比配制复合壁材与蒸馏水混合溶解,蒸馏水用量按固形物用量添加,其中固形物的含量为加入蒸馏水后芯材和壁材所占微胶囊乳化液的质量分数。之后加入乳化剂,并将混合液置于 50 ℃ 水浴锅中,利用磁力搅拌器将其搅拌形成均一的乳化液。将溶有乳化剂单甘酯的木姜子精油作为芯材,加入到壁材乳化液中,在一定温度下乳化 30 min,再经 10000 r/min 均质匀浆 3 min,使其形成均匀稳定的乳化液。将均质过后的乳化液静置于-20 ℃ 冰箱中冷冻 12 h,放入冷阱为-55.2 ℃ 的真空冷冻干燥机进行冷冻干燥 72 h。最后把冷冻干燥后的粉末油脂过 60 目的筛子,使粉末颗粒大小均一。

1.2.1.2 壁材筛选 阿拉伯胶易溶于水,具有良好的乳化性能,成膜性好。大豆分离蛋白具有亲水亲油性,具备良好的乳化性能和成膜能力<sup>[20]</sup>。 $\beta$ -环糊精具有良好的水溶性。选取阿拉伯胶、大豆分离蛋白、 $\beta$ -环糊精两两相互组合作为复合壁材,能够相互弥补在成膜过程中的缺陷。以乳化液的稳定性和包埋率作为评价指标,以此来选择出适宜的壁材。

1.2.1.3 单因素实验 真空冷冻干燥法制备木姜子精油微胶囊并以包埋率为指标,考查各因素对木姜子精油包埋率的影响,确定真空冷冻干燥法制备木姜子精油微胶囊最佳因素水平。本实验选用单甘酯和蔗糖酯作为复合乳化剂,当固形物的含量确定时,复合乳化剂占固形物含量的百分比为微胶囊中乳化剂的含量,并以此来筛选两种乳化剂的最适比例以及最适用量。

固定复合壁材比例为 1:1、乳化剂含量为 3%、乳化剂配比为 1:3、芯壁材比为 1:3、乳化温度为 40 ℃,考察不同固形物含量(10%、15%、20%、25%、30%)对包埋率的影响。固定固形物含量为 15%、其



他因素不变,考察不同复合壁材比例(大豆分离蛋白: $\beta$ -环糊精, 2:1、1:1、1:2、1:3、1:4, g/g)对包埋率的影响。固定复合壁材比为 1:1,其他因素不变,考察乳化剂含量(1%、2%、3%、4%、5%)对包埋率的影响。固定乳化剂含量为 3%,其他因素不变,考察乳化剂配比(单甘酯:蔗糖酯, 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5, g/g)对包埋率的影响。固定乳化剂配比为 1:4,其他因素不变,考察芯壁材比例(1:1、1:2、1:3、1:4、1:5、1:6, g/g)对包埋率的影响。固定芯壁材比为 1:4,其他因素不变,考察乳化温度(30、40、50、60、70  $^{\circ}\text{C}$ )对包埋率的影响。

#### 1.2.1.4 正交法优化木姜子精油微胶囊的制备工艺

结合单因素的实验结果,以复合壁材比例(大豆分离蛋白: $\beta$ -环糊精)、芯壁材比例、固形物含量 3 个因素为考察对象,采用  $L_9(3^4)$  正交试验,并以微胶囊的包埋率作为评价指标,优化木姜子精油微胶囊的包埋工艺。木姜子精油微胶囊正交因素水平表见表 1。

表 1 木姜子精油微胶囊正交因素水平表

Table 1 Essential oil from *Litsea pungens* Hemsl microcapsule orthogonal factor level table

水平	因素		
	A 固形物含量(%)	B 复合壁材比例(g/g)	C 芯壁材比例(g/g)
1	10	2:1	1:3
2	15	1:1	1:4
3	20	1:2	1:5

1.2.1.5 乳化液稳定性的测定 将 1.2.1.2 中均质后的乳化液倒入带刻度的离心管中,于 3000 r/min 离心 10 min 后,取出并观察乳化液的分层情况<sup>[21]</sup>。

$$\text{乳化稳定性}(\%) = \left(1 - \frac{\text{上层分层体积}}{\text{总体积}}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.1.6 木姜子精油微胶囊包埋率的测定 参考罗旭洸等<sup>[22]</sup>的方法并进行修改:经真空冷冻干燥后得到的木姜子精油微胶囊样品,准确称取 2 g 样品,加入 20 mL 石油醚之后轻微振荡浸提 1 min,过滤取滤液,重复两次,合并滤液至锥形瓶中,先将锥形瓶置于 60  $^{\circ}\text{C}$  恒温水浴锅中蒸发出大部分石油醚,之后再将其置于 60  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中恒重。计算式:

$$\text{表面油含量}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中:  $m$  表示样品质量, g;  $m_1$  表示恒重后总质量, g;  $m_2$  表示锥形瓶质量, g。

总油含量的测定:经真空冷冻干燥后得到的木姜子精油微胶囊样品,采用索氏提取的方法,准确称取 2 g 样品,用无水乙醚回流提取 5~8 h,将蒸馏回收提取液中的溶剂倒入已知质量的圆底烧瓶中,置于 65  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中恒重。计算式:

$$\text{总油含量}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中:  $m$  表示样品质量, g;  $m_1$  表示恒重后总质量, g;  $m_2$  表示圆底烧瓶质量, g;

微胶囊包埋率按照公式(4)计算:

$$\text{包埋率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{微胶囊表面油含量}}{\text{微胶囊总油含量}}\right) \times 100 \quad \text{式(4)}$$

#### 1.2.2 木姜子精油微胶囊产品质量评定及微观结构分析

1.2.2.1 木姜子精油微胶囊水分含量的测定 参照 GB/T 5009.3-2016《食品中水分的测定》方法检测<sup>[23]</sup>。

1.2.2.2 木姜子精油微胶囊溶解度的测定 参考张玉等<sup>[24]</sup>的方法:准确称取 5 g 木姜子精油微胶囊样品,置于 50 mL 烧杯中。分数次加入 38 mL 25~30  $^{\circ}\text{C}$  蒸馏水溶解样品,并离心 10 min,之后将上清液倒去。加入 38 mL 蒸馏水使沉淀悬浮后,离心 10 min,将上清液倒去,再加入少量蒸馏水转移沉淀至称量皿中,先于沸水浴中蒸干水分,再于 105  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中至恒重。

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{m_2 - m_1}{(1 - b) \times m_3} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中:  $m_1$  表示称量皿质量, g;  $m_2$  表示称量皿质量和不溶物质量, g;  $m_3$  表示样品质量, g;  $b$  表示样品含水率, %。

1.2.2.3 木姜子精油微胶囊堆积密度的测定 参考朱建宇等<sup>[25]</sup>的方法并进行修改:将微胶囊倒入到量筒中,摇匀振实,准确称取并记录所填充的微胶囊质量( $m$ )及填充体积( $v$ ),计算公式如下:

$$d_0(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{m}{v} \quad \text{式(6)}$$

1.2.2.4 木姜子精油微胶囊 SEM 结构观察 采用扫描电子显微镜观察木姜子微胶囊的表面形貌,将木姜子精油微胶囊分散在贴有导电胶的样品台上,并将多余的粉末吹去,喷金后,采用扫描电子显微镜观察其结构,并选取具有代表性的视野进行拍摄。电子枪加速电压为 3 kV。

#### 1.2.3 木姜子精油微胶囊储藏稳定性分析

1.2.3.1 木姜子精油微胶囊在储存过程中精油挥发率测定 参考刘双双等<sup>[26]</sup>的方法并进行修改:分别称取 200 mg 木姜子精油和含有 200 mg 木姜子精油的微胶囊于烧杯中,然后放入 100  $^{\circ}\text{C}$  的烘箱中,每隔 6 h 分别取样测定挥发率。计算式:

$$\text{挥发率}(\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{式(7)}$$

式中:  $m_0$  表示样品初始质量, mg;  $m_1$  表示样品剩余质量, mg。

1.2.3.2 木姜子精油及其微胶囊在储藏过程中过氧化值的测定 分别将木姜子精油和微胶囊置于 65  $^{\circ}\text{C}$  烘箱中使其加快氧化,每隔 48 h 分别取样,

测定过氧化值。在测定木姜子精油微胶囊过氧化值时,参考周德红等<sup>[27]</sup>的方法,采用碱性乙醚法对微胶囊进行破壁提油处理。其中过氧化值的测定参照GB/T 5009.227-2016《食品中过氧化值的测定》方法检测<sup>[28]</sup>。

### 1.3 数据处理

利用SPSS18.0软件对数据进行ANOVA方差分析和Duncan's多重比较分析, $P<0.05$ 做显著差异检验的标准,结果以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 壁材的选择

分别选取蛋白类、碳水化合物类、胶体类壁材中常用的大豆分离蛋白、 $\beta$ -环糊精及阿拉伯胶三种壁材,进行两两相互组合为复合壁材制备乳化液。由表2可知,与阿拉伯胶和 $\beta$ -环糊精组合、大豆分离蛋白和阿拉伯胶组合相比,大豆分离蛋白与 $\beta$ -环糊精组合而成的复合壁材乳化液稳定性最高,为88.23%( $P<0.05$ )。同样,大豆分离蛋白与 $\beta$ -环糊精组合而成的复合壁材包埋率最高,为73.56%( $P<0.05$ )。可能是因为蛋白质在水中不仅具有较好的乳化性而且成膜性好,形成的膜隔氧率高,此外阿拉伯胶的黏度太大,会导致乳化液过粘稠,乳化不充分,稳定性差,包埋率低<sup>[29]</sup>。因此,综合以上因素,最终确定复合壁材选用大豆分离蛋白和 $\beta$ -环糊精。

表2 复合壁材的筛选  
Table 2 Screening of composite wall material

测定指标	大豆分离蛋白+ $\beta$ -环糊精	阿拉伯胶+ $\beta$ -环糊精	大豆分离蛋白+ 阿拉伯胶
乳化液稳定性(%)	88.23±2.94 <sup>a</sup>	71.43±2.10 <sup>b</sup>	62.22±2.85 <sup>c</sup>
包埋率(%)	73.56±1.72 <sup>a</sup>	63.27±1.63 <sup>b</sup>	54.62±2.03 <sup>c</sup>

注:同行不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.2 单因素实验结果

2.2.1 固形物含量对包埋率的影响 由图1可知,当固形物含量低于15%时,微胶囊包埋率随着固形物含量的增加而增加,在固形物含量为15%时,包埋率最高( $P<0.05$ )。随着固形物含量继续增加,微胶囊的

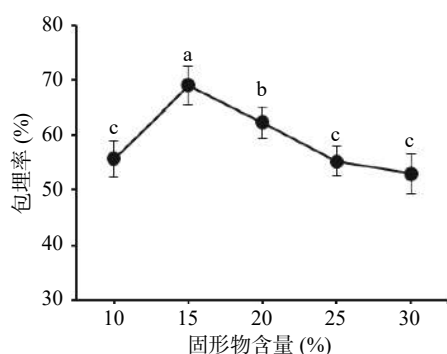


图1 固形物含量对包埋率的影响

Fig.1 Effect of solid content on embedding rate

注:不同字母表示差异显著( $P<0.05$ );图2~图6同。

包埋率呈下降趋势,与张玲云等<sup>[30]</sup>的研究报道类似,这可能是因为当微胶囊中的固形物含量增加时,含水量降低,有利于干燥和囊膜的形成,而当固形物含量达到一定量时,乳化液的黏度增加,乳化不充分,最终导致微胶囊的包埋率下降。综合以上因素,确定固形物含量为15%时包埋率最优。

2.2.2 复合壁材比例对包埋率的影响 由图2可知,微胶囊包埋率随着 $\beta$ -环糊精比例的增加呈现出先增加后降低的趋势。当大豆分离蛋白与 $\beta$ -环糊精的比例为1:1时,包埋率达到最高,为70.93%( $P<0.05$ )。这可能是由于大豆分离蛋白能使油水界面之间的张力降低,容易形成稳定的乳化液,但本身容易受外界环境的变化而直接导致其溶解度降低,影响乳化液的稳定性,因此尽可能的降低大豆分离蛋白的含量将有助于提高乳化液的稳定性。而“内疏水,外亲水”的 $\beta$ -环糊精有助于油脂的包埋,但当 $\beta$ -环糊精的含量进一步增加或提高时,微胶囊的包埋率下降,这主要是因为大豆分离蛋白的乳化稳定性大于 $\beta$ -环糊精,当大豆分离蛋白含量低时,不能在微胶囊中形成较为稳定的乳化液,导致包埋率降低。综合以上因素,确定大豆分离蛋白: $\beta$ -环糊精的最适比例为1:1。

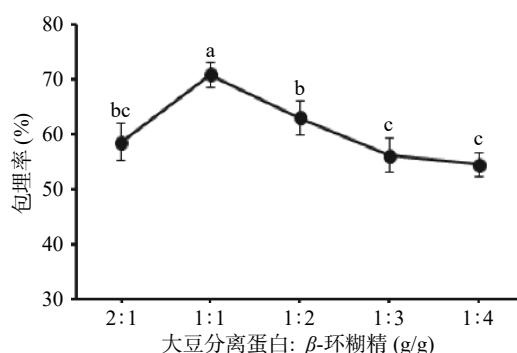


图2 复合壁材比例对包埋率的影响

Fig.2 Effect of composite wall material ratio on embedding rate

2.2.3 乳化剂含量对包埋率的影响 由图3可知,当乳化剂含量低于3%,微胶囊的包埋率随着乳化剂含量的增加而增加,当达到一定量时,逐渐趋于平缓,不再上升。刘鑫等<sup>[31]</sup>研究报道与本结果相似。这可能是因为当乳化剂含量较低时,乳化效果不充分,乳液稳定性差,导致芯壁材不能充分结合。在乳化剂含量为5%时,包埋率为71.66%,与添加量3%和4%间不存在显著性差异( $P>0.05$ )。表明此时乳化效果已达到饱和。综合以上因素,确定乳化剂含量为3%。

2.2.4 乳化剂配比对包埋率的影响 由图4可知,单甘酯比例不变,微胶囊包埋率随着蔗糖酯比例增加而增加,当单甘酯与蔗糖酯的比例为1:4时,包埋率最高,为72.93%,与1:1、1:2间差异显著( $P<0.05$ ),与1:3、1:5不存在显著性差异( $P>0.05$ )。这可能是因为单甘酯是亲油型的表面活性剂,当其溶解后,可增加乳化液的稳定性。蔗糖酯是亲水型的表面活性

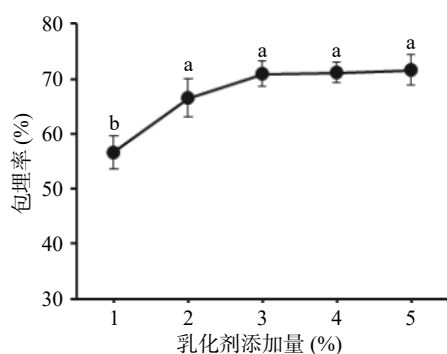


图3 乳化剂含量对包埋率的影响

Fig.3 Effect of emulsifier content on embedding rate

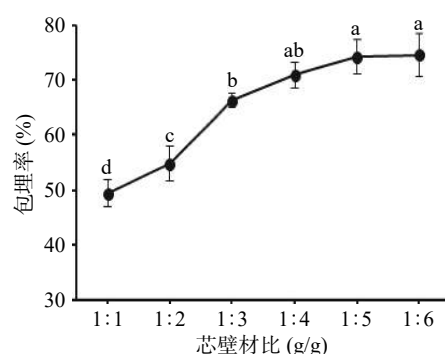


图5 芯壁材比对包埋率的影响

Fig.5 Effect of core wall material ratio on embedding rate

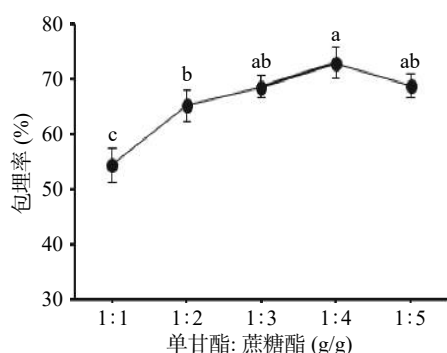


图4 乳化剂比对包埋率的影响

Fig.4 Effect of emulsifier ratio on embedding rate

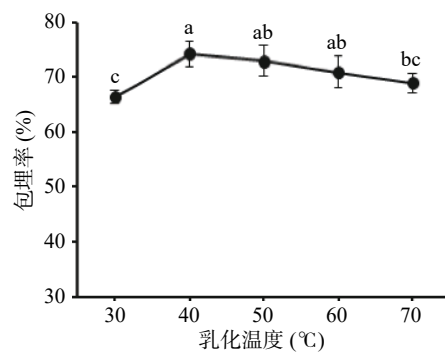


图6 乳化温度对包埋率的影响

Fig.6 Effect of emulsification temperature on embedding rate

剂,对水具有优良的乳化性能,加入到溶液后界面张力显著降低,使体系中的界面状态发生变化,将两者结合使用后能够形成稳定的乳化液,但当其含量较多时,会导致乳化液粘稠。综合以上因素,确定单甘酯:蔗糖酯为 1:4。

**2.2.5 芯壁材比对微胶囊包埋率的影响** 由图 5 可知,芯材比例不变,微胶囊的包埋率随着壁材比例的逐渐增加而增加,当芯壁材比例为 1:4 时,此后包埋率逐渐趋于平缓。在芯壁材比为 1:6 时,包埋率最高,为 74.53%,这可能是因为壁材含量的增加有利于提高乳化液的稳定性。但当芯壁材比为 1:4 时,其包埋率与 1:5 和 1:6 间不存在显著差异( $P>0.05$ ),此时壁材可能已完全包埋住芯材,过多的壁材会造成浪费,综合考虑各因素,因此确定本研究的芯壁材比为 1:4。郑义等<sup>[32]</sup> 研究报道与本结果相似,桂花精油微胶囊包埋率随着壁材添加量的增加呈先增加后逐渐趋于平缓。

**2.2.6 乳化温度对包埋率的影响** 由图 6 可知,当乳化温度低于 40 °C 时,微胶囊包埋率随着乳化温度的升高而增加,到达 40 °C 时,包埋率最高,为 74.20%。随着乳化温度继续升高,包埋率呈下降趋势。这结果与王月月等<sup>[33]</sup> 报道的研究结果类似,这可能是由于温度升高有利于壁材充分溶解,包埋率增加,但温度过高会使蛋白质变性,破坏乳化液的稳定性,导致芯壁材不能充分结合,包埋率下降。而在乳化温度为 40 °C 微胶囊的包埋率达到最高。综合以上因素,确

定乳化温度为 40 °C。

## 2.3 正交试验结果

结合单因素的实验结果,采用  $L_9(3^4)$  正交试验,以包埋率为指标,对木姜子精油微胶囊进行工艺优化。其中,考察因素分别为固形物含量、复合壁材比及芯壁材比。木姜子精油微胶囊正交试验结果及方差分析见表 3、表 4。

由表 3 可以看出:微胶囊包埋效果最好的一组是  $A_2B_2C_3$ ,即芯壁材比为 1:5、复合壁材比(大豆分离蛋白: $\beta$ -环糊精)为 1:1、固形物含量为 15%,此时木姜子精油微胶囊包埋率可达到 84.68%。且极差  $R_C>R_B>R_A$ ,表明芯壁材比的影响最大、其次是复合壁材比和固形物含量。由表 4 正交试验方差分析的结果可以进一步证实,复合壁材比及芯壁材比对木姜子精油微胶囊包埋率的影响显著( $P<0.05$ ),固形物含量的影响不显著。苗钧魁等<sup>[34]</sup> 采用响应面法预测各因素对南极磷虾油微胶囊包埋率的影响大小关系,结果为芯壁质量比>明胶>酪蛋白酸钠,与本研究结果类似。

## 2.4 木姜子精油微胶囊的质量评定

**2.4.1 木姜子精油微胶囊的理化指标测定** 水分含量关系到微胶囊产品结块、发霉的速率,直接影响产品品质和贮藏,因此,水分含量是微胶囊产品的重要指标<sup>[35]</sup>。由表 5 可知,在最佳工艺条件下所得到的木姜子精油微胶囊产品的水分含量为 3.05%,溶解度为 91.04%,堆积密度为 0.35 g/cm<sup>3</sup>。结果表明,木姜



子微胶囊含水量少,品质优良,有利于贮藏有利于储藏。

表 3 木姜子精油微胶囊正交试验结果  
Table 3 Orthogonal test results of microcapsule of essential oil from *Litsea pungens* Hemsl

实验号	因素			包埋率(%)
	A	B	C	
1	1	1	1	64.43
2	1	2	2	79.26
3	1	3	3	81.35
4	2	1	2	75.52
5	2	2	3	84.68
6	2	3	1	69.43
7	3	1	3	80.07
8	3	2	1	69.54
9	3	3	2	77.26
K <sub>1</sub>	225.04	220.02	203.40	
K <sub>2</sub>	229.63	233.48	232.04	
K <sub>3</sub>	226.87	228.04	246.10	
k <sub>1</sub>	75.01	73.34	67.80	
k <sub>2</sub>	76.54	77.83	77.35	
k <sub>3</sub>	75.62	76.01	82.03	
R	1.53	4.49	14.23	

表 4 正交试验结果方差分析表  
Table 4 Analysis of variance of orthogonal test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
A	3.559	2	1.780	2.851	0.260
B	30.565	2	15.283	24.482	0.039
C	315.691	2	157.846	252.863	0.004
误差	1.248	2	0.624		
总计	51961.817	9			

表 5 木姜子精油微胶囊理化指标的测定结果  
Table 5 Results of physical and chemical indexes determination of microcapsule of essential oil from *Litsea pungens* Hemsl

项目	测定结果
水分(%)	3.05±0.09
溶解度(%)	91.04±2.15
堆积密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.35±0.02

2.4.2 木姜子精油微胶囊 SEM 分析 通过扫描电子显微镜得到  $\beta$ -环糊精、大豆分离蛋白、木姜子精油微胶囊结构图,如图 7~图 9 所示。如图 7 所示, $\beta$ -环糊精整体呈块状分布。如图 8A 所示,大豆分离蛋白主要呈球形、块状、还有一些不规则的形状分布;图 8B 为其中一个破损的球形的放大图,可以看出球形内部存在内腔,可以实现对精油包埋。如图 9 所示,所得的木姜子精油微胶囊呈不规则块状,对比  $\beta$ -环糊精和大豆分离蛋白,木姜子精油微胶囊在结构上发生了明显的改变。本研究结果与陈琳等<sup>[36]</sup>采用真空冷冻干燥对紫苏油的研究结果一致,呈现不规则块状。同样,李一喆<sup>[37]</sup>采用冷冻干燥制备的橘皮油微胶囊呈现不规则薄片状。这可能是由于在预冻过程

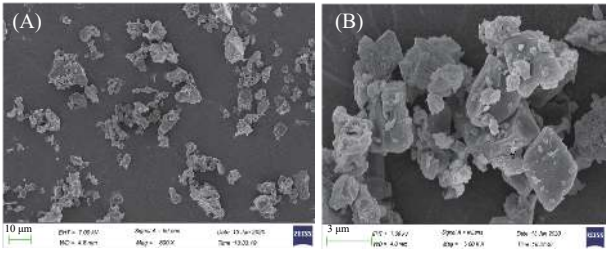


图 7  $\beta$ -环糊精电镜扫描图  
Fig.7 SEM image of  $\beta$ -cyclodextrin  
注:(A)~(B)标尺分别为 10、3  $\mu$ m。

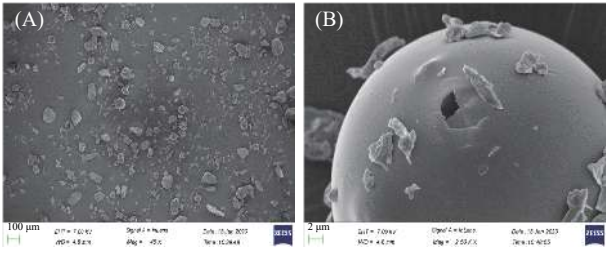


图 8 大豆分离蛋白电镜扫描图  
Fig.8 SEM image of soy protein isolate  
注:(A)~(B)标尺分别为 100、2  $\mu$ m;图 9 同。

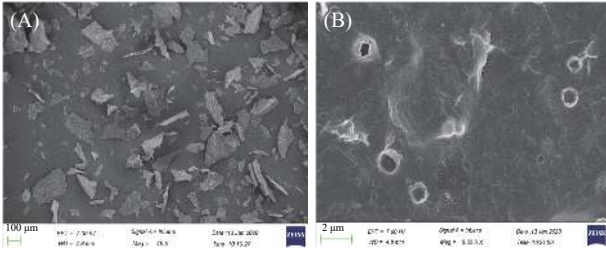


图 9 木姜子精油微胶囊电镜扫描图  
Fig.9 SEM image of essential oil from *Litsea pungens* Hemsl

中,液态水形成冰晶,破坏了原有的乳化结构。目前的研究表明,微胶囊根据包埋手段和材料的不同,常为球形也可以为菱形、粒状和块状等<sup>[38]</sup>。

2.5 木姜子精油微胶囊储藏稳定性分析

2.5.1 木姜子精油及其微胶囊在储藏过程中精油挥发率变化 木姜子精油及微胶囊的挥发率如图 10 所示,木姜子精油和微胶囊化木姜子精油中均有部分的精油随着时间的延长而挥发,但是二者的挥发速率存在明显差异。在加热到 30 h 时,木姜子精油的挥发率高达 43.43%,而微胶囊化木姜子精油的挥发率只有 12.35%,微胶囊化木姜子精油的挥发率远远低于木姜子精油。经过微胶囊包埋后,壁材对木姜子精油起到了保护作用,使得被包埋的木姜子精油挥发速率减缓。王娣等<sup>[39]</sup>制备百里香精油微胶囊,其微胶囊的挥发速率远远低于精油的挥发速率。由此可见,精油的微胶囊化能够有效地降低精油的挥发速率。

2.5.2 木姜子精油微胶囊在储藏过程中过氧化值变化 由图 11 可知,木姜子精油及其木姜子精油微胶囊的过氧化值均随着储藏时间的延长而增大。在初始阶段(0~2 d),木姜子精油微胶囊的过氧化值高于

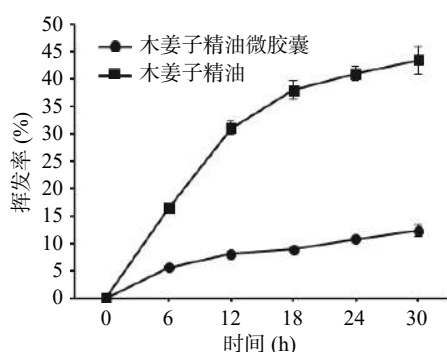


图 10 微胶囊化对木姜子精油挥发率的影响

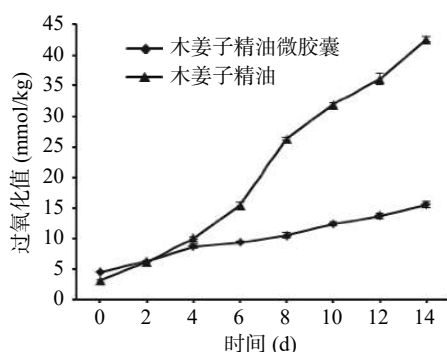
Fig.10 Effect of microencapsulation on volatilization rate of essential oil from *Litsea pungens* Hemsl

图 11 木姜子精油及微胶囊的过氧化值变化

Fig.11 Change of peroxide value of essential oil and microcapsule of *Litsea pungens* Hemsl

木姜子精油的过氧化值;这是因为在微胶囊制备过程中,精油暴露在环境中,发生氧化反应,导致过氧化值较高。随后,木姜子精油的过氧化值随着时间的增长开始慢慢升高,到第 6 d 后升高速度加快;可能是因为精油中所含有的抗氧化成分起到了一定的保护作用,当抗氧化成分被消耗完后,氧化速度加快。而木姜子精油微胶囊的过氧化值随着时间的增长也在缓慢上升,但上升速度明显慢于木姜子精油。在 14 d 时,比较木姜子精油及其微胶囊的过氧化值,发现后者远低于前者,实验结果与香茅油微胶囊<sup>[40]</sup>、肉桂精油微胶囊<sup>[41]</sup>、连翘叶精油微胶囊<sup>[42]</sup>等的研究结果相符,说明微胶囊化有效减缓精油的挥发,提高精油的储藏稳定性,延长精油储藏时间。此外,Leimann 等<sup>[43]</sup>采用 GS-MS 对柠檬草精油微胶囊中  $\alpha$ -柠檬醛和  $\beta$ -柠檬醛的含量进行了测定,结果发现其含量在微胶囊后没有发生损失,表明微胶囊化可以使活性物质得到有效保护,防止营养物质的损失与破坏,提高精油的稳定性,控制活性成分的释放,达到减缓香气挥发及减少氧化,延长储存时间的目的<sup>[44]</sup>。

### 3 结论

本实验得到木姜子精油微胶囊的最佳工艺条件为:复合壁材比为 1:1(g/g)、芯壁材比 1:5(g/g)、固形物含量 15%、乳化剂含量 3%、乳化剂配比 1:4(g/g)、乳化温度 40 ℃,在此条件下制备出的木姜子精油微胶囊包埋率可达到 84.68%。其水分含量、溶解度及堆

积密度分别为  $3.05\%\pm 0.09\%$ 、 $91.04\%\pm 2.15\%$ 、 $(0.35\pm 0.02)\text{g}/\text{cm}^3$ ,表明采用最佳工艺条件制备的微胶囊品质良好,干燥且利于储藏。通过电镜扫描结果显示木姜子精油微胶囊呈不规则块状且包埋较好。随着时间的增长,木姜子精油微胶囊的挥发率和储藏过程中油脂的过氧化值均低于木姜子精油的值。木姜子精油微胶囊化,能够有效减缓精油的挥发速度,同时降低精油发生过氧化的程度。

### 参考文献

- [1] 范会,马红红,左定财,等.木姜子储存过程中挥发性成分的变化[J].中国调味品,2017,42(4):64-68. [FAN Hui, MA Honghong, ZUO Dingcai, et al. The change of volatile components in *Litsea cubeba* (Lour.) Pers. during storage[J]. China Condiment, 2017, 42(4): 64-68.]
- [2] 郑维艳,曹坤芳.未来气候变化对四种木姜子地理分布的影响[J].广西植物,2020,40(11):1584-1594. [ZHENG Weiyan, CAO Kunfang, Impact of future climate change on potential geographical distribution of four *Litsea* species in china[J]. Guihaia, 2020, 40(11): 1584-1594.]
- [3] 陆小鸿.“消寒止痛”木姜子[J].广西林业,2017(5):20. [LU Xiaohong. “Dissipate cold and relieve pain” *Litsea cubeba* [J]. Forestry of Guangxi, 2017(5): 20.]
- [4] 张爱华,唐春艳,胡楠,等.我国山苍子产业发展现状及对策[J].生物质化学工程,2020,54(6):25-32. [ZHANG Aihua, TANG Chunyan, HU Nan, et al. Investigation on the development of the *Litsea cubeba*(Lour.) Pers. industry in China[J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(6): 25-32.]
- [5] 赖鹏英,肖志红,黎继烈,等.山苍子果实制备精油与核仁油的研究进展[J].湖南林业科技,2019,46(1):65-69. [LAI Pengying, XIAO Zhihong, LI Jilie, et al. Research progress on essential oil and kernel oil from *Litsea cubeba* Fruit[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2019, 46(1): 65-69.]
- [6] GAO Ming, CHEN Yicun, WANG Yangdong. Evaluation of the yields and chemical compositions of the essential oils of different *Litsea cubeba* varieties[J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2016, 19(8): 1888-1902.
- [7] 赵欧,班大明,陈海霞.GC/MS测定不同采收季节山苍子油的化学成分[J].广州化工,2020,48(10):94-97. [ZHAO Ou, BAN Daming, CHEN Haixia. Determination of chemical content of *Litsea cubeba* oil in different harvest seasons by GC/MS[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(10): 94-97.]
- [8] 秦婷,吕奇琦,李兴宇,等.以柠檬醛为原料的香料合成研究进展[J].广州化工,2014,42(20):19-20. [QIN Ting, LV Qiqi, LI Xingyu, et al. Research advance of synthesis of perfume in citral as starting material[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(20): 19-20.]
- [9] 王小丽,钟有添,黄真.赣南产山苍子油成分分析与抗菌活性研究[J].赣南医学院学报,2017,37(6):848-850. [WANG Xiaoli, ZHONG Youtian, HUANG Zhen. Antibacterial activity research and composition analysis on *Litsea cubeba* oil produced in south of Jiangxi province[J]. Journal of Gannan Medical University, 2017, 37(6): 848-850.]
- [10] YANG Yu, JIANG Jiazheng, QIMEI Luobu, et al. The



- fungicidal terpenoids and essential oil from *Litsea cubeba* in Tibet[J]. *Molecular Diversity Preservation International*, 2010, 15(10): 7075–7082.
- [11] DAI Jinming, LI Changzhu, CUI Haiying, et al. Unraveling the anti-bacterial mechanism of *Litsea cubeba* essential oil against *E. coli* O157: H7 and its application in vegetable juices[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 338: 1–11.
- [12] 刘甜甜, 张星, 熊兴耀, 等. 25% 山苍子油水乳剂的研发及其对马铃薯晚疫病病菌的防治效果[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(10): 85–91. [LIU Tiantian, ZHANG Xing, XIONG Xingyao, et al. Development of 25% *Litsea cubeba* essential oil EW and its control effect on *Phytophthora infestans*[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(10): 85–91.]
- [13] YANG Yujing, LIN Mengyi, FENG Shuyi, et al. Chemical composition, antibacterial activity, and mechanism of action of essential oil from *Litsea cubeba* against foodborne bacteria[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): 1–9.
- [14] DHAKAL S P, HE J. Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: A review[J]. *Food Research International*, 2020: 137.
- [15] FELIPE J B, SANGHAMITRA K, EUGENIA C L. Microencapsulation of algal biomass (*Tetraselmis chuii*) by spray-drying using different encapsulation materials for better preservation of beta-carotene and antioxidant compounds[J]. *Algal Research*, 2018, 36: 229–238.
- [16] GUO Jiayue, LI Peilong, KONG Lingyan, et al. Microencapsulation of curcumin by spray drying and freeze drying[J]. *LWT*, 2020, 132: 1–24.
- [17] CHARLES A L, ABDILLAH A AI, SARASWATI Y R, et al. Characterization of freeze-dried microencapsulation tuna fish oil with arrowroot starch and maltodextrin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021: 112.
- [18] 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 Xinyue, CHEN Chengli, DONG Quan. Preparation and characterization of chia seed oil microcapsules[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(5): 200–207.]
- [19] 王月月, 段续, 任广跃, 等. 洋葱精油微胶囊制备工艺优化及其品质分析[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 232–238. [WANG Yueyue, DUAN Xu, REN Guangyue, et al. Optimization of preparation technology and quality of onion essential oil microcapsules[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 232–238.]
- [20] 邢小鹏, 吴高峻, 孙华. 大豆分离蛋白的功能特性[J]. *食品工业科技*, 2000(4): 74–76. [XING Xiaopeng, WU Gaojun, SUN Hua. Functional properties of soybean protein isolate[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2000(4): 74–76.]
- [21] 袁彬. 芝麻香油粉末油脂的生产工艺研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017. [YUAN Bin. Study on production technology of sesame oil powder[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017.]
- [22] 罗旭洗, 杨慧, 刘晓娟, 等. 广佛手精油微胶囊制备工艺优化及其品质分析[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(5): 198–205. [LUO Xuguang, YANG Hui, LIU Xiaojuan, et al. Preparation process optimization and quality analysis of bergamot essential oil microcapsules[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2019, 35(5): 198–205.]
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.3-2016 National food safety standards determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [24] 张玉, 罗婧文, 马燕卿, 等. 不同干燥技术对牡丹籽油微胶囊品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(15): 128–133. [ZHANG Yu, LUO Jingwen, MA Yangqing, et al. Effect of different drying techniques on the quality of peony seed oil microcapsules[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(15): 128–133.]
- [25] 朱建宇, 齐宝坤, 张小影, 等. 喷雾干燥制备大豆油脂体微胶囊及其品质分析[J]. *食品工业科技*, 2019: 146–153. [ZHU Jianyu, QI Baokun, ZHANG Xiaoying, et al. Preparation and quality analysis of soybean oleosome microcapsules by spray drying method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019: 146–153.]
- [26] 刘双双, 张彦军, 徐飞, 等. 香草兰精油微胶囊的制备工艺优化及缓释性分析[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(7): 170–177. [LIU Shuangshuang, ZHANG Yanjun, XU Fei, et al. Process optimization and slow release analysis of vanilla oil microencapsulated[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(7): 170–177.]
- [27] 周德红, 郑为完, 石燕, 等. 月见草油微胶囊粉末油脂中油脂过氧化值测定之提油方法的研究[J]. *食品科技*, 2006(7): 215–218. [ZHOU Dehong, ZHENG Weiwan, SHI Yan, et al. Research on oil extraction methods in peroxide value determination of microencapsulated evening primrose oil[J]. *Food Science & Technology*, 2006(7): 215–218.]
- [28] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.227-2016 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.227-2016, National food safety standards determination of peroxide value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [29] XUE Feng, LI Chen, ADHIKARI Benu. Physicochemical properties of soy protein isolates-cyanidin-3-galactoside conjugates produced using free radicals induced by ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 104990.
- [30] 张玲云, 张敏, 杨心怡, 等. 大黄鱼鱼卵油微胶囊制备工艺及其性质表征[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(7): 126–132. [ZHANG Lingyun, ZHANG Min, YANG Xinyi, et al. Preparation process and characterization properties of large yellow croaker roe oil microcapsules[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(7): 126–132.]
- [31] 刘鑫, 朱丹, 牛广财, 等. 沙棘籽油微胶囊化的乳化工艺[J]. *食品工业*, 2020, 41(2): 101–105. [LIU Xin, ZHU Dang, NIU Guangcai, et al. Emulsification technology of microencapsulation of seed oil of seabuckthorn[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(2): 101–105.]

- [32] 郑义, 俞益芹, 黄陈, 等. 桂花精油微胶囊制备工艺优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 216–221. [ZHENG Yi, YU Yiqin, HUANG Chen, et al. Optimum processing of *Osmanthus* essential oil microcapsule[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(10): 216–221.]
- [33] 王月月, 段续, 任广跃, 等. 洋葱精油微胶囊喷雾干燥制备工艺优化及释放性能分析[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 198–205. [WANG Yueyue, DUAN Xu, RENG Guangyue, et al. Optimization of spray drying preparation and release property analysis of onion essential oil microcapsules[J]. Food and Machinery, 2019, 35(11): 198–205.]
- [34] 苗钧魁, 魏书磊, 刘小芳, 等. 响应面法优化南极磷虾油微胶囊喷雾干燥制备工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 139–144. [MIAO Junkui, WEI Shulei, LIU Xiaofang, et al. Optimization of spray drying process for *Antarctic krill* oil microcapsule by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 139–144.]
- [35] 牛广财, 朱丹, 李志江, 等. 南瓜籽油微胶囊化的研究[J]. 中国农学通报, 2007(9): 181–185. [NIU Guangcai, ZHU Dan, LI Zhijiang, et al. Study on micro-encapsulation of pumpkin seed oil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007(9): 181–185.]
- [36] 陈琳, 李荣, 姜子涛, 等. 微胶囊化方法对紫苏油包埋性能的比较研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 176–180. [CHEN Lin, LI Rong, JIANG Zitao, et al. Comparative study on properties of the microcapsule of *Perilla* oil entrapped with different microencapsulation methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(20): 176–180.]
- [37] 李一喆. 橘皮油微胶囊制备及其理化性质研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020. [LI Yizhe. Research on the microencapsulated mandarin oil preparation technology and the physico-chemical property of the microcapsule[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.]
- [38] 彭莹芸. 葡萄柚精油微胶囊的制备及稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019. [PENG Yingyun. Preparation and stability of grapefruit essential oil microcapsules[D]. Changsha: Hunan University, 2019.]
- [39] 王娣, 许晖, 汪张贵, 等. 百里香精油的微胶囊制备及其缓释性能[J]. 食品科学, 2013, 34(6): 60–63. [WANG Di, XU Hui, WANG Zhanggui, et al. Microencapsulation and controlled-release properties of *Thymus* oil[J]. Food Science, 2013, 34(6): 60–63.]
- [40] BANCHAY, WEERAWUT K, WANDEE R, et al. Response surface optimization of spray-dried citronella oil microcapsules with reduced volatility and irritation for cosmetic textile uses[J]. Powder Technology, 2019, 355: 372–385.
- [41] YANG Kuan, LIU Aiping, HU Aoxue, et al. Preparation and characterization of cinnamon essential oil nanocapsules and comparison of volatile components and antibacterial ability of cinnamon essential oil before and after encapsulation[J]. Food Control, 2020.
- [42] 刘星, 丁琨, 李冠文, 等. 连翘叶精油微胶囊制备工艺优化及其对油脂抗氧化的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(6): 76–83. [LIU Xing, DING Kun, LI Guanwen, et al. Optimization of preparation technology of *Forsythia suspense* leaves essential oil microcapsule and its effects on antioxidation of oil[J]. Storage and Process, 2020, 20(6): 76–83.]
- [43] FERNANDA V L, ODINEI H G, RICARDO A F, et al. Antimicrobial activity of microencapsulated lemongrass essential oil and the effect of experimental parameters on microcapsules size and morphology[J]. Materials Science & Engineering C, 2008, 29(2): 430–436.
- [44] MAULIDNA B, BASUKI W A, TAMRIN A, et al. Microencapsulation of ginger-based essential oil(*Zingiber cassumunar* Roxb) with chitosan and oil palm trunk waste fiber prepared by spray-drying method[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020, 18: 1–6.