

## 响应曲面法橄榄油微胶囊化工艺优化研究

梁佳钰<sup>a</sup>, 杨春莉<sup>b</sup>, 车丹<sup>a</sup>, 柳双双<sup>a</sup>, 王莹<sup>a</sup>, 杨春瑜<sup>a</sup>

(哈尔滨商业大学 a.食品工程学院黑龙江省食品科学与工程重点实验室 b.轻工学院, 哈尔滨 150028)

**摘要:** **目的** 通过响应曲面试验确定制备橄榄油微胶囊的最佳工艺。**方法** 以大豆分离蛋白和黑木耳多糖为新型壁材, 橄榄油为芯材, 亚麻籽胶为乳化剂, 采用乳液聚合-冷冻干燥法制备橄榄油微胶囊, 其实实验指标为包埋率, 并利用透射电镜观察微胶囊的形态。**结果** 在固形物质量分数为 15.4%、壁芯材体积比为 5:1、乳化剂的质量分数为 0.24% 的条件下, 包埋率可达到 77.22%。通过透射电镜观察微胶囊形态可知, 橄榄油微胶囊基本呈圆球形, 分布均匀, 包埋效果较好。**结论** 响应曲面试验可以很好地对橄榄油微胶囊的制备工艺条件进行优化, 制备的橄榄油微胶囊对橄榄油的抗氧化作用有着加强效果。

**关键词:** 橄榄油; 微胶囊; 乳液聚合; 响应曲面; 包埋率

中图分类号: TS225; R944 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)07-0011-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.07.002

## Optimization of Microencapsulation of Olive Oil by Response Surface Methodology

LIANG Jia-yu<sup>a</sup>, YANG Chun-li<sup>b</sup>, CHE Dan<sup>a</sup>, LIU Shuang-shuang<sup>a</sup>, WANG Ying<sup>a</sup>, YANG Chun-yu<sup>a</sup>

(a.Key Laboratory of Food Science and Engineering of Heilongjiang Province, School of Food Engineering

b.School of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**ABSTRACT:** To determine the optimal encapsulation technology of olive oil through response surface methodology (RSM). Isolated soybean protein and polysaccharides from *Auricularia auricula* were used as new wall materials, olive oil was used as core materials and linseed gum was used as emulsifier to prepare olive oil microcapsules by emulsion polymerization-freeze drying method. The experimental index was embedding rate and the microcapsules was observed by morphology of transmission electron microscope. Under the conditions of solid content of 15.4%, wall-core ratio of 5:1 and emulsifier content of 0.24%, the embedding rate reached 77.22%. The transmission electron microscope observing results showed that the microcapsules of olive oil were basically spherical, evenly distributed and with good embedding condition. RSM can be used to optimize the preparation conditions of olive oil microcapsules. The final microcapsules of olive oil have better antioxidant effect than olive oil.

**KEY WORDS:** olive oil; microcapsule; emulsion polymerization; response surface; embedding rate

橄榄油具有抗衰老<sup>[1-2]</sup>、降低血脂<sup>[3]</sup>、防癌等功效<sup>[4]</sup>, 其中不饱和脂肪酸质量分数约为 90%以上<sup>[5]</sup>, 易与空气接触, 发生油脂过氧化现象, 从而严重损害橄榄油的营养成分和品质<sup>[6-7]</sup>。微胶囊化使油脂利于贮藏<sup>[8-9]</sup>, 能避免变质<sup>[10-12]</sup>。微胶囊技术中的乳液聚

合法基本原理: 在含有乳化剂的溶液中溶解壁材, 再加芯材物质, 搅拌形成稳定的乳化液, 然后在加热条件下形成微胶囊。该法具有易操作、重复效果好、条件温和等优点, 而且工艺流程简单, 并能很好地保留芯材的有效成分<sup>[13]</sup>。

收稿日期: 2019-01-21

基金项目: 哈尔滨市科技局应用技术研究与开发优秀学科带头人项目 (2016RAXXJ003); 黑龙江省教育厅资助项目 (12511123)

作者简介: 梁佳钰 (1994—), 女, 哈尔滨商业大学硕士生, 主攻农产品加工。

通信作者: 杨春瑜 (1975—), 女, 博士, 哈尔滨商业大学教授, 主要研究方向为生物分离纯化技术。

文中拟研究采用响应曲面法,以大豆分离蛋白和黑木耳多糖为新型壁材,对橄榄油进行微胶囊化,确定最佳工艺条件,使橄榄油的抗氧化稳定性增加,为以后开发橄榄油产品提供经验。

## 1 实验

### 1.1 材料与试剂

材料和试剂:大豆分离蛋白,辽宁阜新市维远蛋白科技有限公司;黑木耳,东宁润乡山产品有限公司;正己烷,天津市天力化学试剂有限公司;亚麻籽胶,河南方大食品添加剂有限公司;橄榄油,中欧天然食品股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

仪器与设备:HC-TP11-5型架盘药物天平,上海精密科学仪器有限公司;HH-2型数显恒温水浴锅,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;ST-10型多功能粉碎机,永康市帅通工具有限公司;DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,河南予华仪器有限公司;101-2A型电热鼓风干燥箱,上海一恒科技有限公司;R-201型旋转蒸发器,上海申胜生物技术有限公司;FD-18型冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;SHB-3型循环水式多用真空泵,郑州长城科工贸有限公司;PHS-3C型数显酸度计,杭州奥立龙仪器有限公司;UV-6100紫外-可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;IKAT18Digital数显型分散机,艾卡仪器设备有限公司;GL-2LM冷冻离心机,上海市离心机械研究所有限公司;KQ-800GKDV型高功率恒温数显超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;H-7650型透射电子显微镜,天美日立公司。

## 2 实验方法

### 2.1 黑木耳多糖的制备

黑木耳多糖的制备参考于美汇等人的方法<sup>[4]</sup>。

### 2.2 橄榄油标准曲线的建立

用正己烷配制质量浓度为10 mg/mL的橄榄油标准溶液,配制不同浓度的橄榄油溶液(见表1),在波长228 nm处测其吸光度的数值。以吸光度值为纵坐标,橄榄油浓度为横坐标,得到橄榄油标准曲线的回归方程。

### 2.3 橄榄油微胶囊制备

采用乳液聚合法制备橄榄油微胶囊<sup>[15]</sup>,选择大豆分离蛋白和黑木耳多糖为壁材,加入乳化剂亚麻籽胶于水中溶解均匀,在一定温度下缓慢加入芯材橄榄油搅拌乳化,形成乳化液,然后充分均质,最后

表1 橄榄油标准溶液的配制  
Tab.1 Preparation of olive oil standard solution

序号	橄榄油标准溶液体积/mL	正己烷体积/mL	橄榄油质量浓度/(mg·mL <sup>-1</sup> )
1	0	2	0
2	0.05	1.95	0.25
3	0.1	1.9	0.5
4	0.15	1.85	0.75
5	0.2	1.8	1.0
6	0.25	1.75	1.25
7	0.3	1.7	1.5

冷冻干燥制成橄榄油微胶囊。对壁材配比、壁芯材比例、乳化剂的变量、黑木耳多糖的变量、乳化温度、均质时间等进行单因素实验,以包埋率为检测条件,得出最好方案。

### 2.4 包埋率的测定

1) 包埋率的测定参照刘施琳<sup>[16]</sup>的方法,并稍作改变。

2) 总油测定方法。称取0.5 g微胶囊,加入200 mL正己烷。磁力搅拌0.5 h,用超声波清洗仪超声20 min,在转速10 000 r/min下离心5 min。取2 mL上清液在228 nm处测定吸光值,代入橄榄油标准曲线,得到总油量( $W_2$ )。

3) 表面油测定方法。称取0.5 g微胶囊,加入20 mL正己烷,并充分溶解,在转速10 000 r/min下离心5 min。取2 mL上清液在228 nm处测定其吸光值,代入橄榄油标准曲线,得到表面油量( $W_1$ ),将其代入式(1)计算包埋率:

$$P = (1 - W_1/W_2) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $P$ 为包埋率(%); $W_1$ 为表面油量(mg/mL); $W_2$ 为总油量(mg/mL)。

### 2.5 单因素试验

#### 2.5.1 固形物含量对包埋率的影响

分别按质量分数为5%、10%、15%、20%、25%的固形物配制10 mL壁材溶液,壁材溶液与橄榄油体积比为5:1,加入质量分数为0.25%的乳化剂,添加黑木耳多糖的质量分数为0.2%,然后在温度55℃下乳化30 min,在转速10 000 r/min下均质3 min,然后冷冻干燥,测定包埋率。

#### 2.5.2 壁芯材比例对包埋率的影响

以质量分数为15%的固形物来配制10 mL壁材溶液,分别按壁材溶液与橄榄油体积比为2:1,3:1,4:1,5:1,6:1加入橄榄油,加入质量分数为0.25%的乳化剂,添加质量分数为0.2%的黑木耳多糖,然后在温度55℃下乳化30 min,在转速10 000 r/min下均质3 min,然后冷冻干燥,测定包埋率。

### 2.5.3 乳化剂含量对包埋率的影响

以质量分数为 15% 的固形物来配制 10 mL 壁材溶液，壁材溶液与橄榄油体积比为 5 : 1，分别选取质量分数为 0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.3% 的乳化剂，添加质量分数为 0.2% 的黑木耳多糖，然后在温度 55 °C 下乳化 30 min，在转速 10 000 r/min 下均质 3 min，冷冻干燥，测定包埋率。

### 2.5.4 黑木耳多糖含量对包埋率的影响

以质量分数为 15% 的固形物来配制 10 mL 壁材溶液，壁材溶液与橄榄油体积比为 5 : 1，加入质量分数为 0.25% 的乳化剂，分别添加质量分数为 0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.3% 的黑木耳多糖，然后在温度 55 °C 下乳化 30 min，在转速 10 000 r/min 下均质 3 min，冷冻干燥，测定包埋率。

### 2.5.5 乳化温度对包埋率的影响

以质量分数为 15% 的固形物来配制 10 mL 壁材溶液，壁材溶液与橄榄油体积比为 5 : 1，加入质量分数为 0.25% 的乳化剂，添加质量分数为 0.2% 的黑木耳多糖，然后分别在温度为 45、50、55、60、65 °C 条件下乳化 30 min，在转速为 10 000 r/min 下均质 3 min，冷冻干燥，测定包埋率。

### 2.5.6 均质时间对包埋率的影响

以质量分数为 15% 的固形物来配制 10 mL 壁材溶液，壁材溶液与橄榄油体积比为 5 : 1，加入质量分数为 0.25% 的乳化剂，添加质量分数为 0.2% 的黑木耳多糖，在温度为 55 °C 下乳化 30 min，在转速为 10 000 r/min 下分别均质 1.5、2、2.5、3、3.5 min，冷冻干燥，测定包埋率。

## 2.6 响应面试验

根据单因素试验结果，选择固形物含量、壁芯材比及乳化剂含量为自变量，以包埋率为响应值，根据 Box-Behnken 设计优化试验，因素与水平设计见表 2。

表 2 响应面试验因素水平  
Tab.2 Factors and levels in response surface test

水平	因素		
	固形物质量分数( $X_1$ )/%	壁芯材比值( $X_2$ )	乳化剂质量分数( $X_3$ )/%
-1	10	4	0.2
0	15	5	0.25
+1	20	6	0.3

## 2.7 微胶囊 TEM 形态观察

取少量微胶囊，在装有蒸馏水的小烧杯中分散，制成悬浮液，滴入磷钨酸(2%)染色 3 min 后，将铜

网没入染色液中，静置数分钟，滤纸吸去多余液体，待干燥后用 TEM 观察微胶囊产品形态。

## 3 结果与讨论

### 3.1 橄榄油的标准曲线

得到了橄榄油的标准曲线方程： $y=0.5481x+0.0273$ ， $R^2=0.9908$ ，标准曲线见图 1。

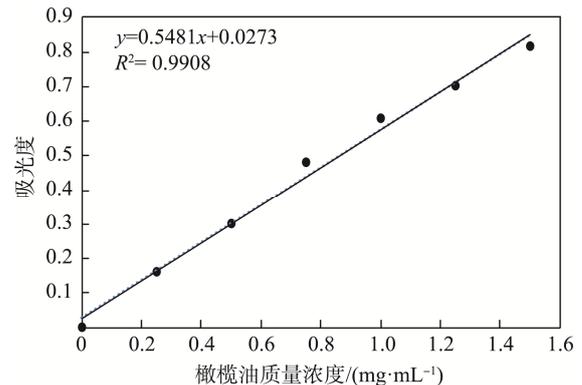


图 1 橄榄油标准曲线  
Fig.1 Olive oil standard curve

### 3.2 单因素试验

#### 3.2.1 固形物含量对包埋率的影响

由图 2 可知，微胶囊的包埋率随着固形物质量分数的增加，先增大后减小，在固形物的质量分数为 15% 时最大。乳化液粘度变大，在固形物的质量分数多于 15% 时，乳化搅拌和均质不充分，包埋率减小，由此可见，最佳的固形物质量分数确定为 15%。

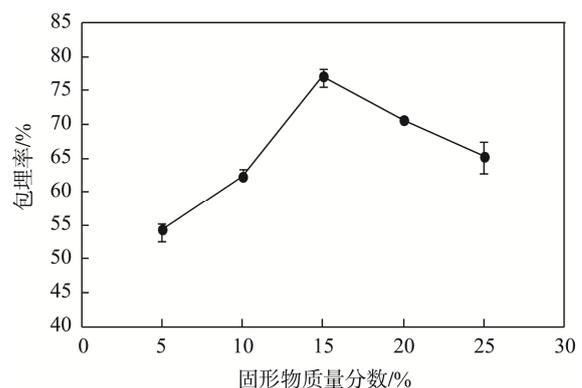


图 2 固形物含量对包埋率的影响  
Fig.2 Effects of solid content on embedding

#### 3.2.2 壁芯材比对包埋率的影响

由图 3 可知，包埋率随着壁芯材体积比的增加，先增大后平缓。由于壁材的增加使乳化液的黏度增大，提高了乳化液的稳定性；芯材的增加会使壁材与芯材反应逐渐达到饱和状态，芯材过多，使壁材不能完全包埋芯材。当壁芯材体积比为 6 : 1 时，包埋率

达到最大值 (75.93%)。由于橄榄油随着壁芯材体积比的增加含量会减少,且壁芯材的体积比为 6:1 和 5:1 的包埋率相差不大,因此选择壁芯材体积比为 5:1 时包埋的效果最合适。

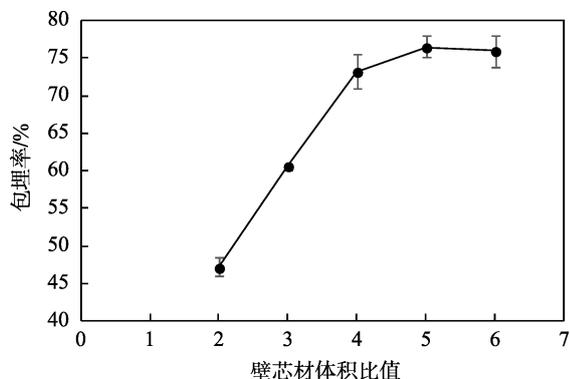


图3 壁芯材比值对包埋率的影响  
Fig.3 Effects of wall/core ratio material on embedding

### 3.2.3 乳化剂含量对包埋率的影响

由图4可知,微胶囊的包埋率随着乳化剂含量的增加先是缓慢增大,当达到质量分数为0.2%以后迅速增大,在质量分数为0.25%时为最大,之后逐渐减小。推测原因估计是加入乳化剂会使乳化液的粘度增加,壁芯材结合效果得到提高,随之包埋率增大;当乳化液粘度过大时,均质不均匀,包埋率减小。由此可见,选择乳化剂的质量分数为0.25%。

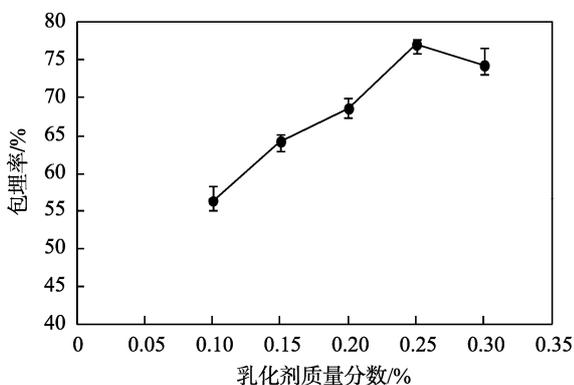


图4 乳化剂含量对包埋率的影响  
Fig.4 Effects of emulsifier content on embedding

### 3.2.4 黑木耳多糖含量对包埋率的影响

由图5可知,包埋率随着黑木耳多糖质量分数的增加而增大,在质量分数为0.2%时达到最大,之后减小。当添加黑木耳多糖质量分数大于0.2%时,超过黑木耳多糖及大豆分离蛋白组成的壁材稳定值,大豆分离蛋白含量会减少,乳化液稳定性减小。由此可见,选取质量分数0.2%为黑木耳多糖的添加量。

### 3.2.5 乳化温度对包埋率的影响

由图6可知,微胶囊的包埋率随着乳化温度的升

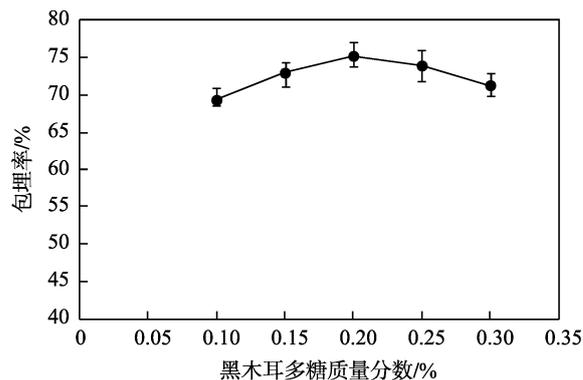


图5 黑木耳多糖添加量对包埋率的影响  
Fig.5 Effects of polysaccharide content from *Auricularia auricula* on embedding

高先增大后减小,在55℃时最大。随着温度的升高,壁材的粘度会下降,均质效果变好,包埋率增大。当温度继续升高时,蛋白变性,破坏了壁芯材的结合,乳化效果减弱,包埋率减小。由此可见,乳化温度确定为55℃。

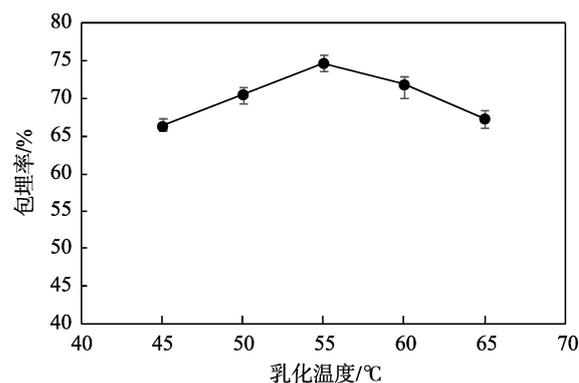


图6 乳化温度对包埋率的影响  
Fig.6 Effects of emulsification time on embedding

### 3.2.6 均质时间对包埋率的影响

由图7可知,当均质时间增加时,包埋率先缓慢增大,后迅速增大,在均质时间为3min后略微

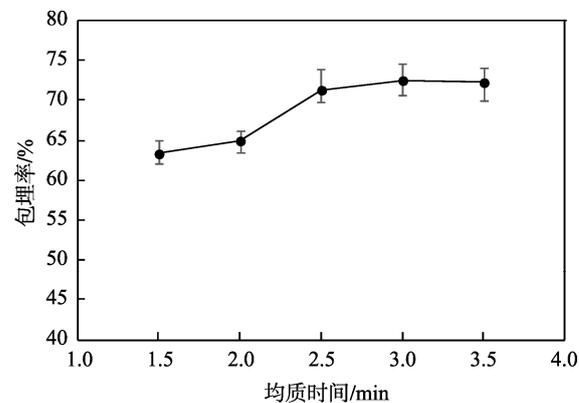


图7 均质时间对包埋率的影响  
Fig.7 Effects of homogenization time on embedding

下降。随着均质时间的增加，乳化液的黏度会下降，微胶囊的稳定性也下降，从而使包埋率下降。由此可知，均质时间对微胶囊包埋率的影响极显著，因此均质时间选择为 3 min。

### 3.3 响应曲面法实验结果及分析

#### 3.3.1 响应曲面法实验设计及结果

在单因素试验的基础上，以固形物含量  $A$ 、壁芯材比例  $B$ 、乳化剂含量  $C$  为考察因素，包埋率为因变量，设计试验，结果见表 3。

#### 3.3.2 响应曲面多元二次模型建立及方差分析

因素水平见表 3，利用 Design-Expert 8.06 软件对包埋率进行数据处理，得到回归方差分析表，并进行多元线性拟合分析，得到回归方程： $Y=78.24+0.74A+0.62B-1.39C+4.00AB+0.30AC-3.70BC-9.09A^2-4.51B^2-6.41C^2$ ，方差分析结果见表 4。

二次多项分析模型见表 4，可以看出该模型回归极显著 ( $P<0.01$ )，失拟误差项不显著 ( $P>0.05$ )，且该模型  $R^2=0.9866$ ，说明模型实验拟合较好，可以通过此模型来预测微胶囊包埋率最优条件。在回归方程中， $AB$ ， $BC$ ， $A^2$ ， $B^2$ ， $C^2$  对包埋率影响极显著 ( $P<0.01$ )， $C$  对包埋率影响显著 ( $P<0.05$ )。  $F$  值越大，因素对包埋率影响越大，由表 4 可知，因素对包埋率影响的大小关系依次为：乳化剂含量>固形物

含量>壁芯材比值。

表 3 响应曲面试验的设计及结果  
Tab.3 Design and results of response surface experiment

实验号	固形物质量 分数 A/%	壁芯材 比值 B	乳化剂质量 分数 C/%	包埋率/%
1	-1	1	0	60.35
2	0	1	1	62.06
3	0	0	0	78.42
4	0	-1	-1	65.19
5	0	1	-1	73.74
6	1	0	1	62.92
7	1	1	0	70.26
8	1	-1	0	60.93
9	-1	0	1	61.27
10	0	0	0	79.13
11	-1	-1	0	67.03
12	-1	0	-1	63.17
13	1	0	-1	63.62
14	0	0	0	76.63
15	0	0	0	77.36
16	0	0	0	79.67
17	0	-1	1	68.32

表 4 回归方程方差分析  
Tab.4 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	812.44	9	90.27	57.22	< 0.0001	**
A	4.37	1	4.37	2.77	0.1401	
B	3.05	1	3.05	1.93	0.2070	
C	15.54	1	15.54	9.85	0.0164	*
AB	64.08	1	64.08	40.62	0.0004	**
AC	0.36	1	0.36	0.23	0.6474	
BC	54.83	1	54.83	34.76	0.0006	**
A <sup>2</sup>	347.98	1	347.98	220.58	< 0.0001	**
B <sup>2</sup>	85.59	1	85.59	54.25	0.0002	**
C <sup>2</sup>	172.79	1	172.79	109.53	< 0.0001	**
残差	11.04	7	1.58			
失拟误差	4.81	3	1.60	1.03	0.4695	
纯误差	6.24	4	1.56			
总离差	823.48	16				
模型决定系数		$R^2=0.9866$				
模型调整决定系数		$R^2_{adj}=0.9693$				

注：\*\*表示极显著 ( $P<0.01$ )；\*表示显著 ( $P<0.05$ )

3.3.3 根据等高线和响应面分析因素间的交互作用  
利用 Design-Expert 软件,生成响应曲面见图

8—10。观察各因素之间的相互作用对包埋率的影响作用。

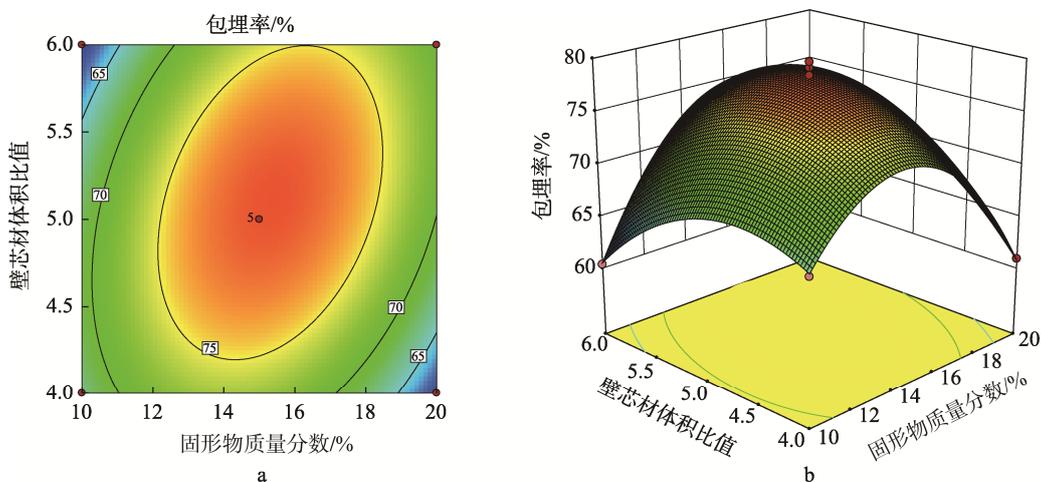


图 8  $DH=f(A, B)$  的等高线和响应曲面  
Fig.8 Contour plot and responsive surface of  $DH=f(A, B)$

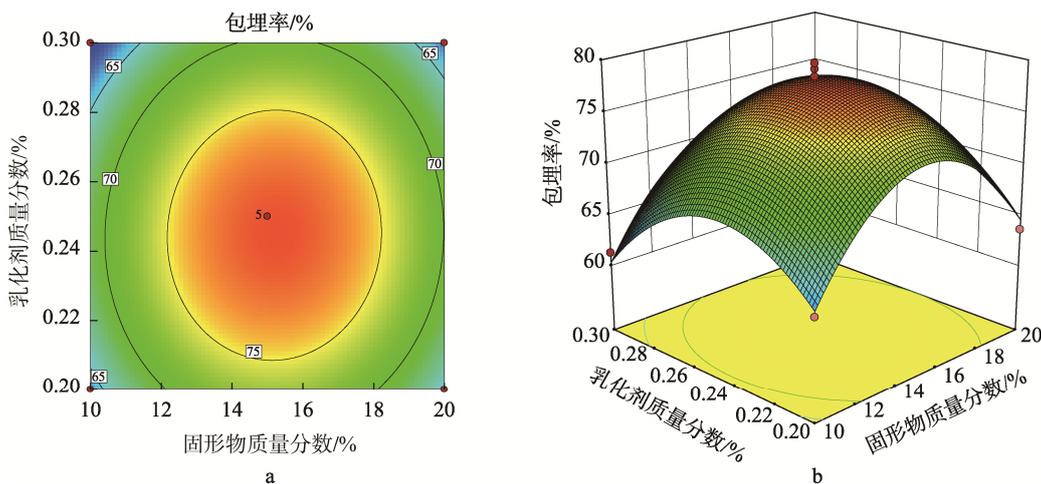


图 9  $DH=f(A, C)$  的等高线和响应曲面  
Fig.9 Contour plot and responsive surface of  $DH=f(A, C)$

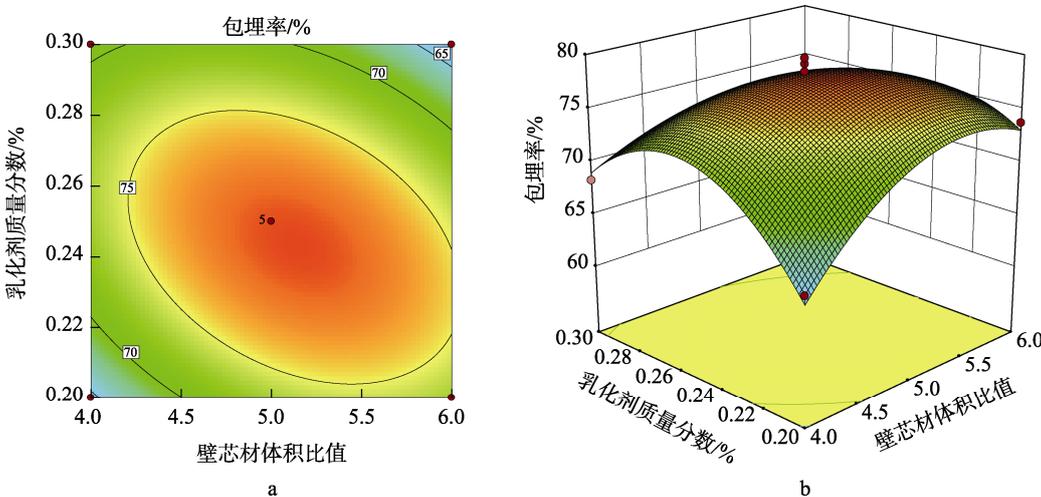


图 10  $DH=f(B, C)$  的等高线和响应曲面  
Fig.10 Contour plot and responsive surface of  $DH=f(B, C)$

由图 8 可知，响应曲面坡度陡峭，等高线呈椭圆形，当固形物含量处于低值与高值时，随着壁芯材比值的增加，包埋率都先增加后减小。说明壁芯比和固形物含量交互作用显著，与表 4 中交互项值的分析结果一致。由图 9 可以看出，等高线近似圆形，当固形物含量处于低值与高值时，随着乳化剂含量的增加，包埋率都先增加后减小。乳化剂含量和固形物含量交互作用不显著，与表 4 中的交互项值的分析结果一致。由图 10 可以看出，等高线呈椭圆形，响应曲面较为平缓，当壁芯材比值处于低值与高值时，随着乳化剂含量的增加，包埋率都先增加后减小。说明乳化剂含量和壁芯比的交互作用对包埋率影响显著，与表 4 中分析结果一致。由此可知，响应面法可以用来对微胶囊的制备工艺进行优化。

### 3.3.4 验证实验

根据响应曲面法优化分析，得到了理论上的最佳

制备工艺条件。当固形物质量分数为 15.37%，壁芯材体积比值为 5.16，乳化剂质量分数为 0.24%时，包埋率为 78.43%。

在最佳条件下，考虑到实际操作情况，将制备橄榄油微胶囊工艺条件确定为：固形物质量分数 15.4%，壁芯材体积比值 5，乳化剂质量分数 0.24%。重复做 3 次实验，得出橄榄油微胶囊包埋率的实际值分别为 77.05%，78.46%，76.14%，平均包埋率为 77.22%。与理论预测值相差 1.21%，由此可见利用响应面法优化制备微胶囊可行。

### 3.4 微胶囊 TEM 形态观察结果

微胶囊群体见图 11b，从整体来看，以大豆分离蛋白和黑木耳多糖为壁材制备的橄榄油胶囊近似呈球形，直径范围为 2~10  $\mu\text{m}$ 。放大 20 000 倍的微胶囊个体见图 11a，呈球形的透射电镜视图是比较理想的个体颗粒形态。

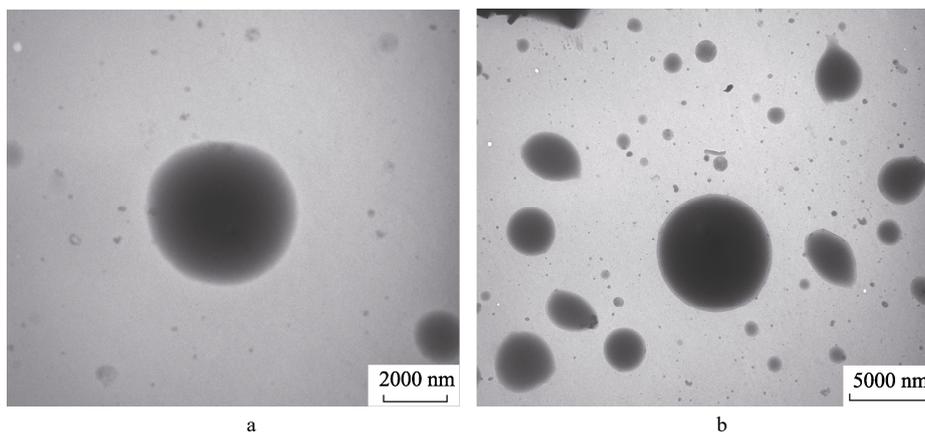


图 11 透射电镜图片  
Fig.11 TEM image

## 4 结语

以大豆分离蛋白和黑木耳多糖为新型壁材，根据响应曲面法软件进行参数的最优化分析，得到了最佳的制备橄榄油微胶囊工艺条件：固形物质量分数为 15.4%，壁芯材体积比为 5 : 1，乳化剂质量分数为 0.24%，得出橄榄油微胶囊的包埋率为 77.22%。制备的橄榄油微胶囊在透射电镜下，直径范围为 2~10  $\mu\text{m}$ ，可看到颗粒分布均匀，多数近似呈圆形。该研究为橄榄油在抗氧化稳定性方面提供了理论基础，优化制备出的微胶囊具有良好的形态，这样可以扩大橄榄油的应用范围，并为以后开发橄榄油产品提供借鉴。

### 参考文献：

[1] MOHAMED A G, IBRAHIM S, ELKHAYAT S E, et al.

Natural Anti-obesity Agents[J]. Bulletin of Faculty of Pharmacy, Cairo University, 2014, 52(2): 269—184.

- [2] KADRI N, KHETTAL B, AID Y, et al. Some Physico-chemical Characteristics of Pinus (Pinus Halepensis Mill, Pinus Pinea L, Pinus Pinaster and Pinus Canariensis) Seeds from North Algeria, Their Lipid Profiles and Volatile Contents[J]. Food Chemistry, 2015, 188(1): 184—192.
- [3] LEE J W, LEE K W, LEE S W, et al. Selective Increase in Pinolenic Acid (all-cis-5,9,12-18:3) in Korean Pine Nut Oil by Crystallization and Its Effect on LDL-receptor Activity[J]. Lipids, 2004, 39(4): 383—387.
- [4] KADRI N, KHETTAL B, ADJEBLI A, et al. Antiangiogenic Activity of Neutral Lipids, Glycolipids, and Phospholipids Fractions of Pinus Halepensis Mill Seeds[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 54: 6—12.
- [5] 龙正海, 王道平. 油茶籽油与橄榄油化学成分研究

- [J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 121—123.
- LONG Zheng-hai, WANG Dao-ping. Chemical Constituents of Olive Oil and from Camellia Oleifera Seed Oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(2): 121—123.
- [6] LEE Y H, CHOOHO C, WATAWANA I M, et al. Evaluation of the Total Antioxidant Capacity and Antioxidant Compounds of Different Solvent Extracts of Chilgoza Pine Nuts(Pinus Gerardiana)[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 1086(10): 1—8.
- [7] TIAN G F, LI Y, YUAN Q P, et al. The Stability and Degradation Kinetics of Sulforaphene in Microcapsules Based on Several Biopolymers Via Spray Drying[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 122: 5—10.
- [8] YOUSAF A M, KIM D W, KIM J K, et al. Novel Fenofibrate-loaded Gelatin Microcapsules with Enhanced Solubility and Excellent Flowability: Preparation and Physicochemical Characterization[J]. Powder Technology, 2015, 275: 257—262.
- [9] VELASCO J, DOBARGANES M C, MARQUEZ-RUIZ G. Variables Affecting Lipid Oxidation in Dried Microencapsulated Oils[J]. Grasasy Aceites, 2003, 54(3): 304—314.
- [10] AGHBASHLO M, MOBLI H, MADADLOU A, et al. Influence of Wall Material and Inlet Drying Air Temperature on the Microencapsulation of Fish Oil by Spray Drying[J]. Food Bioprocess Technol, 2013, 6(6): 1561—1569.
- [11] LOKSUWAN J. Characteristics of Microencapsulated  $\beta$ -carotene Formed by Spray Drying with Modified Tapioca Starch, Native Tapioca Starch and Maltodextrin[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(5/6): 928—935.
- [12] GHARSALLAOUI A, RALOUDAUT G, CHAMBIN O. Applications of Spray-drying in Microencapsulation of Food Ingredients: an Overview[J]. Food Research International, 2007, 40(9): 1107—1112.
- [13] ASBAHANI A E, MILADI K, BADRI W, et al. Essential Oils: from Extraction to Encapsulation[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2015, 483(1/2): 220—243.
- [14] 于美汇, 赵鑫, 尹红力, 等. 碱提醇沉黑木耳多糖体外和体内降血脂功能[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 232—237.
- YU Hui-mei, ZHAO Xin, YIN Hong-li, et al. In Vitro and in Vivo Hypolipidemic Effect of Auricularia Auricular Polysaccharides[J]. Food Science, 2017, 38(1): 232—237.
- [15] 李斌, 许彬, 程爽, 等. 光皮柞木籽油微胶囊化及其制品的理化性质[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(10): 58—62.
- LI Bin, XU Bin, CHENG Shuang, et al. Physical and Chemical Properties of Cornus Wilsoniana Seed Oil Microcapsules and Its Product[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(10): 58—62.
- [16] 刘施琳, 李天骄, 林圣楠, 等. 微藻油微胶囊化技术研究[J]. 中国食品学报, 2017, 17(11): 90—98.
- LIU Shi-lin, LI Tian-jiao, LIN Sheng-nan, et al. Studies on the Micro Encapsulation Technology of Microalgae Oil[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(11): 90—98.