

## 沙棘籽油微胶囊制备及其特性研究

向殷丰,刘睿杰,常明,金青哲,王兴国

(江南大学食品学院,食品安全与营养协同创新中心,江苏无锡214122)

**摘要:**基于复合壁材的沙棘籽油微胶囊制备工艺,以包埋率为指标,在单因素实验基础上采用正交实验优化制备工艺,并对其特性及微胶囊化对沙棘籽油性质的影响进行了研究。结果表明:制备沙棘籽油微胶囊的最佳工艺条件为以酪蛋白酸钠和麦芽糊精为壁材、酪蛋白酸钠与麦芽糊精质量比1:1、壁材与芯材质量比2:1、固形物含量20%。最佳工艺条件下制备的沙棘籽油微胶囊产品粒径分布均匀,包埋率可达96.15%;热失重分析说明沙棘籽油微胶囊具备良好的热稳定性;微胶囊化前后,沙棘籽油不饱和脂肪酸含量变化不大;经过微胶囊包埋的沙棘籽油与未包埋的沙棘籽油相比,氧化诱导时间在高温加速储存过程中明显延长,具备较好的氧化稳定性。

**关键词:**沙棘籽油;微胶囊;复合壁材;热稳定性;氧化稳定性;脂肪酸组成

中图分类号:TS225.1;TS201.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)01-0012-06

## Preparation and characteristics of sea – buckthorn seed oil microcapsule

XIANG Yinfeng, LIU Ruijie, CHANG Ming, JIN Qingzhe, WANG Xingguo

(Synergetic Innovation Center of Food Safety and Nutrition, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Preparation of sea – buckthorn seed oil microcapsule based on compound wall materials was studied. With embedding rate as index, the preparation conditions were optimized by orthogonal experiment based on single factor experiment. The characteristics of microcapsule and the effects of microencapsulation on the properties of sea – buckthorn seed oil were studied. The results showed that the optimal preparation conditions were obtained as follows: sodium caseinate and maltodextrin used as wall materials, mass ratio of sodium caseinate to maltodextrin 1:1, mass ratio of wall material to core material 2:1, solid content 20%. Under the optimal conditions, the embedding rate reached 96.15%, and the microcapsule had uniform particle size distribution. Thermogravimetric analysis revealed that sea – buckthorn seed oil microcapsule had good thermal stability. Before and after microencapsulation of sea – buckthorn seed oil, the content of unsaturated fatty acids changed little. Compared with the unembedded sea – buckthorn seed oil, the microencapsulated sea – buckthorn seed oil had significantly prolonged oxidation induction time during high – temperature accelerated storage and had good oxidative stability.

**Key words:** sea – buckthorn seed oil; microcapsule; compound wall materials; thermal stability; oxidative stability; fatty acid composition

沙棘(*Hippophae rhamnoides*)又名刺柳、酸刺柳、

黑棘、酸刺,为胡颓子科沙棘属灌禾或小乔木。沙棘具有耐寒、耐旱的特点,在我国北方和西部地区作为防止风沙、保持水土的植物被广泛种植。研究表明,沙棘籽的含油量一般为8%左右,高的可达15%~16%<sup>[1]</sup>,且油中富含油酸、亚油酸和亚麻酸,总不饱和脂肪酸含量将近90%<sup>[2]</sup>。此外,沙棘籽油还含有多种生理活性成分<sup>[3]</sup>,具有杀菌、止痛,促进组织再

收稿日期:2019-02-26;修回日期:2019-07-25

作者简介:向殷丰(1994),女,在读硕士,研究方向为脂质营养(E-mail)550619429@qq.com。

通信作者:刘睿杰,副教授,博士(E-mail)liuruijie163@163.com。

生,抗衰老,抗疲劳,增强肌体活力和免疫力等功效<sup>[4]</sup>。

沙棘籽油作为功能性油脂,在食品及医药保健品领域有广泛的应用前景,但目前针对其产品的进一步开发研究甚少,常见的产品有沙棘籽油口服液、沙棘籽油乳剂及沙棘籽油软胶囊等<sup>[5]</sup>。由于沙棘籽油含有丰富的不饱和脂肪酸,其生产及储存过程中易氧化酸败,且油剂或乳剂的直接食用或饮用风味不佳,难以进行广泛推广。利用微胶囊技术对沙棘籽油进行包埋,可有效延缓油脂氧化,便于产品储存及运输<sup>[6]</sup>。刘光宪等<sup>[7]</sup>对不同壁材制备的沙棘籽油微胶囊性质进行了研究,但并未对加工工艺与原料配方等进行深入的探究。目前,关于沙棘籽油微胶囊的研究较少,对其加工工艺、性能表征等研究尚浅。本研究在初步确定沙棘籽油微胶囊最佳壁材组合后,以酪蛋白酸钠、麦芽糊精为壁材,采用喷雾干燥法制备沙棘籽油微胶囊,在单因素实验的基础上采用正文实验对工艺条件进行优化。同时,对沙棘籽油微胶囊的性质进行表征,对其稳定性进行评价,以期对沙棘籽油的深加工提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

沙棘籽油,北京宝得瑞食品有限公司;酪蛋白酸钠(CAS),食品级,麦克林生化科技有限公司;大豆分离蛋白(SPI),食品级,山东必盛生物科技有限公司;乳清分离蛋白(WPI),食品级,英国 Myprotein 公司;麦芽糊精(MD),食品级,泰州聚丰源生物科技有限公司。

正己烷、甲醇为色谱纯,其他试剂均为分析纯。

#### 1.1.2 仪器与设备

C-MAG 加热磁力搅拌器、Ultra-Turrax T25 高速分散机,德国 IKA 仪器设备有限公司;GEA Niro 高压均质机,意大利 GEA Niro Soavi 公司;尼鲁喷雾干燥机,北京霍尔斯生物科技有限公司;多角度粒度与高灵敏度 Zeta 电位分析仪,美国布鲁克海文仪器公司;热重分析仪,梅特勒-托利多仪器有限公司;超声波清洗仪,昆山禾创超声仪器有限公司;Agilent 7820 气相色谱仪,安捷伦科技有限公司;Rancimat 油脂氧化稳定性分析仪,瑞士万通中国有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 沙棘籽油微胶囊的制备

称取一定质量比的复合壁材于 50~60℃ 的水中,搅拌溶解 30 min 后,在 750 r/min 下磁力搅拌 4

h 至壁材完全溶解。缓慢加入一定量的沙棘籽油,于 19 000 r/min 下高速剪切 5 min,得到沙棘籽油初乳液,在 30 MPa 下高压均质 2 次。最后在进风温度 180℃、进样量 12 mL/min、出风温度 85℃ 条件下喷雾干燥,得到沙棘籽油微胶囊。

#### 1.2.2 包埋率测定

##### 1.2.2.1 表面油含量的测定

参考刘成祥等<sup>[8]</sup>的方法测定微胶囊表面油含量。

##### 1.2.2.2 总含油量测定

采用氯仿-甲醇超声波辅助法提取微胶囊中的沙棘籽油<sup>[9]</sup>。按下式计算微胶囊总含油量。

$$\text{总含油量} = (M_2 - M_1) / M_0 \times 100\%$$

式中: $M_0$ 为微胶囊质量,g; $M_2$ 为提油后干燥至恒重的样品与圆底烧瓶总质量,g; $M_1$ 为空圆底烧瓶质量,g。

##### 1.2.2.3 包埋率计算

$$\text{包埋率} = (1 - \text{表面油含量} / \text{总含油量}) \times 100\%$$

#### 1.2.3 粒径分布测定

取 0.5 g 沙棘籽油微胶囊分散于 200 mL 蒸馏水中,完全溶解后,使用多角度粒度与高灵敏度 Zeta 电位分析仪测定粒径,绘制粒径分布图。

#### 1.2.4 热失重分析

采用热重分析仪进行热失重分析,控制氮气流量为 20 mL/min,以 10℃/min 升温速率从 20℃ 升温至 600℃,测定热失重曲线。

#### 1.2.5 脂肪酸组成分析

微胶囊中沙棘籽油的提取方法同 1.2.2.2。脂肪酸组成的测定采用气相色谱法,具体参考文献[10]。

#### 1.2.6 氧化诱导时间的测定

参考文献[11]中的方法:将沙棘籽油微胶囊及沙棘籽油样品同时置于 60℃ 的烘箱中储存,每天取样,按 1.2.2.2 方法提取微胶囊中的油脂。精确称取 3.000 0 g(精确到 0.000 1 g)油样于反应管中,在 110℃、空气流速 20 L/h 的条件下测定油样的氧化诱导时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合壁材的选择

MD 由于成本低、溶解度好、不易氧化以及在高浓度下保持低黏度等特性,在微胶囊中使用广泛。但 MD 乳化性能不佳,因此需与其他具备良好乳化性能的壁材复合使用,其中 MD 与蛋白类作为复合壁材在功能性油脂的微胶囊化中应用广泛<sup>[12]</sup>。

分别将 MD 与 SPI、WPI 和 CAS 按照质量比 1:1

进行复配,在乳液固形物含量 20%、壁材与芯材质量比 2:1 条件下进行喷雾干燥,以微胶囊包埋率、微胶囊复水粒径及氧化诱导时间为指标,综合确定最佳蛋白类型。表 1 为 3 种不同蛋白与 MD 复配后沙棘籽油微胶囊的包埋效果。

表 1 3 种不同蛋白与 MD 复配后微胶囊的包埋效果

复合壁材	包埋率/%	微胶囊复水粒径/nm	氧化诱导时间/h
SPI + MD	89.02 ± 0.04 <sup>b</sup>	534.00 ± 3.45 <sup>c</sup>	7.77 ± 0.35 <sup>b</sup>
WPI + MD	67.63 ± 0.99 <sup>a</sup>	392.92 ± 6.29 <sup>b</sup>	3.95 ± 0.11 <sup>a</sup>
CAS ± MD	93.88 ± 0.91 <sup>c</sup>	326.35 ± 5.00 <sup>a</sup>	8.20 ± 0.13 <sup>b</sup>

注:表中同列数据不同字母表示差异显著性( $P < 0.05$ )。

由表 1 可知,不同壁材复配得到的沙棘籽油微胶囊包埋率有较大的差异,其中复合壁材为 CAS 与 MD 的微胶囊包埋率显著高于其他 2 种复合壁材( $P < 0.05$ ),而复合壁材为 WPI 与 MD 的微胶囊包埋率最低,为 67.63%,其原因是 WPI 的乳化性能较 CAS 与 SPI 差。此外,3 种微胶囊中,WPI 与 MD 为壁材的产品氧化诱导时间显著短于其他 2 种( $P < 0.05$ ),氧化稳定性差,主要是因其包埋率低,导致多余的沙棘籽油留存在微胶囊表面而易被氧化<sup>[13]</sup>。CAS 与 MD 为复合壁材的微胶囊复水后粒径最小,与其他 2 种相比具有显著性差异( $P < 0.05$ )。研究表明<sup>[14]</sup>,乳液粒径会影响喷雾干燥过程中微胶囊的形成,进而影响其包埋率。综合分析,选择 CAS 与 MD 作为复合壁材。

## 2.2 单因素实验

### 2.2.1 CAS 与 MD 质量比对微胶囊包埋率的影响

固定壁材与芯材质量比 2:1、乳液固形物含量 20%,考察 CAS 与 MD 质量比分别为 2:1、3:2、1:1、1:2、2:3 时对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响,结果见图 1。

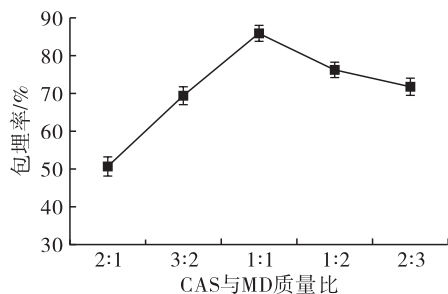


图 1 CAS 与 MD 质量比对微胶囊包埋率的影响

由图 1 可知,沙棘籽油微胶囊包埋率随着 MD 含量的增加呈先增加后降低趋势。复合壁材中,CAS 作为乳化剂,在形成良好乳状液滴过程中起重要作用。当 CAS 比例过低时,乳化程度低,不能较

好地包被芯材。MD 在包埋过程中起到了填充的作用,因而当 MD 比例过低时,形成的微胶囊膜致密性较差,不利于包埋<sup>[15]</sup>。因此,本实验选择 CAS 与 MD 质量比为 1:1 进行优化实验。

### 2.2.2 壁材与芯材质量比对微胶囊包埋率的影响

固定 CAS 与 MD 质量比 1:1、固形物含量 20%,考察壁材与芯材质量比分别为 2:1、3:2、1:1、1:2、2:3 时对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响,结果见图 2。

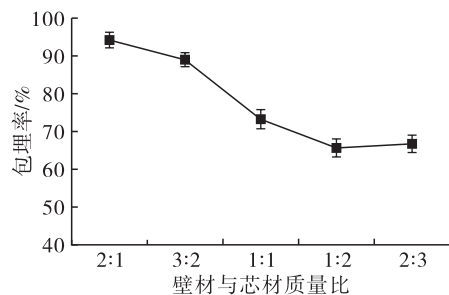


图 2 壁材与芯材质量比对微胶囊包埋率的影响

由图 2 可知,当壁材与芯材质量比为 2:1 时,包埋率最高。随着芯材含量的增加,包埋率呈降低趋势。主要原因为随着芯材含量增加,壁材的相对含量减少,在乳化过程中形成的乳状液稳定性下降,从而导致喷雾干燥形成的微胶囊成膜性差,表面油含量过高而包埋率下降。本实验选择壁材与芯材质量比为 2:1 进行优化实验。

芯材与壁材的比例大小也决定了载油量的大小。高载油量即高比例的芯材可提高产量并减少壁材的使用,但过高的芯材含量会导致包埋率的降低与表面油含量的升高,从而导致微胶囊产品的溶解度、氧化稳定性降低等,对产品的质量产生不良影响。Hogan 等<sup>[16]</sup>以 CAS 为壁材包埋大豆油,当壁芯比从 4:1 降低至 1:3 时,包埋率从 89.2% 下降至 18.8%,可见壁芯比对微胶囊包埋率有显著影响。

### 2.2.3 固形物含量对微胶囊包埋率的影响

当固形物含量高于 25% 时,乳液黏度过高,在喷雾干燥过程中流动性太差而无法形成较好的微胶囊<sup>[17]</sup>,因此选择不超过 25% 的固形物含量进行单因素实验。固定 CAS 与 MD 质量比 1:1、壁材与芯材质量比 2:1,考察乳液固形物含量分别为 10%、15%、20%、25% 时对沙棘籽油微胶囊包埋率的影响,结果见图 3。

由图 3 可知,随着乳液固形物含量的增加,微胶囊包埋率先上升后下降,固形物含量为 20% 时包埋率最高。当固形物含量为 10% 时,微胶囊包埋率最低,主要原因是此时乳液含水量大,喷雾干燥时水分

干燥不完全而导致产品包埋不佳。当固形物含量进一步增大时,乳液黏度增加,不利于喷雾干燥的雾化过程而导致包埋率下降。因此,确定乳液最佳固形物含量为20%。

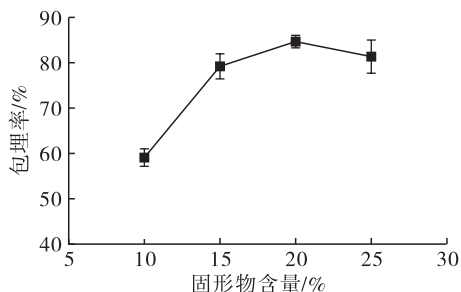


图3 固形物含量对微胶囊包埋率的影响

乳液固形物含量对微胶囊包埋率的影响十分重要,含量过高会导致乳液的黏度增大,不利于喷雾干燥的进行。此外,固形物含量增大的同时也会导致壁材含量增大,此时过多的壁材无法溶解完全,从而无法与芯材形成均一乳状液而影响微胶囊产品质量。

### 2.3 正交实验

基于单因素实验结果,采用 $L_9(3^4)$ 正交表,以CAS与MD质量比(A)、壁材与芯材质量比(B)、固形物含量(C)作为考察因素,以包埋率为考察指标,进行正交实验。正交实验因素水平见表2,正交实验设计与结果见表3,正交实验方差分析见表4。

表2 正交实验因素水平

水平	A	B	C/%
1	1:1	1:1	15
2	1:2	3:2	20
3	2:3	2:1	25

表3 正交实验设计与结果

实验号	A	B	C	空列	包埋率/%
1	1	1	1	1	67.12
2	1	2	2	2	82.34
3	1	3	3	3	90.34
4	2	1	2	3	72.40
5	2	2	3	1	70.22
6	2	3	1	2	84.77
7	3	1	3	2	70.66
8	3	2	1	3	73.22
9	3	3	2	1	95.17
$k_1$	79.93	70.06	75.04	77.50	
$k_2$	75.80	75.26	83.30	79.26	
$k_3$	79.68	90.09	77.07	78.65	
R	4.13	20.03	8.26	1.76	

表4 正交实验方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F	显著性
A	32.281	2	6.781	
B	648.402	2	136.199	**
C	111.299	2	23.379	*
误差	4.761	2		

注: $F_{0.05(2,2)} = 19$ ,  $F_{0.01(2,2)} = 99$ , \*表示影响显著, \*\*表示影响极显著。

由表3可知,各因素对包埋率影响的主次顺序为 $B > C > A$ ,即壁材与芯材质量比 $>$ 固形物含量 $>$ CAS与MD质量比。由表4可知,壁材与芯材质量比对微胶囊包埋率影响极显著( $P < 0.01$ ),固形物含量对微胶囊包埋率影响显著( $P < 0.05$ )。实验范围内最佳的因素水平组合为 $A_1B_3C_2$ ,即CAS与MD质量比为1:1,壁材与芯材质量比为2:1,固形物含量为20%。在最佳条件下进行验证实验,得到沙棘籽油微胶囊包埋率为96.15%。

### 2.4 沙棘籽油微胶囊的粒径分布(见图4)

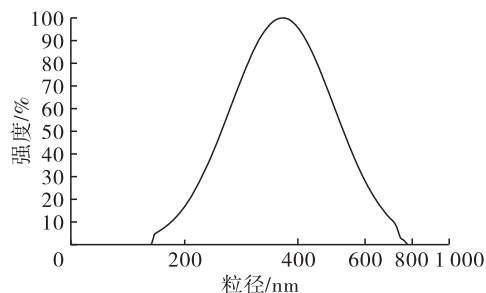


图4 沙棘籽油微胶囊粒径分布

由图4可知,沙棘籽油微胶囊的粒径呈正态分布,范围为160~760 nm,平均粒径为372 nm,所制备的沙棘籽油微胶囊粒径分布均匀且集中。

### 2.5 沙棘籽油微胶囊的热失重曲线(见图5)

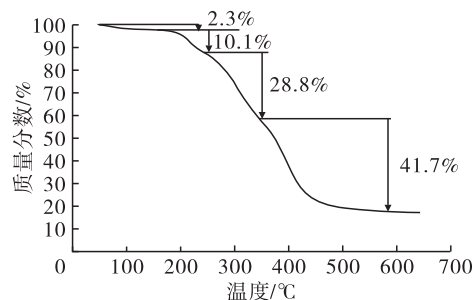


图5 沙棘籽油微胶囊热失重曲线

热失重过程可反映产品的分解过程,同时也可体现沙棘籽油微胶囊的热稳定性。由图5可知,在50~100°C内曲线出现了小幅度下降,约有2.3%的质量损失,此阶段损失的质量主要为微胶囊样品中的自由水。在100~200°C范围内,曲线趋于平缓,可知样品几乎没有发生失重,处于热稳定区。在

200~450℃范围内,曲线迅速下降,此过程中的质量损失超过70%,说明该过程中沙棘籽油微胶囊发生了分解。这个过程包括3个失重阶段:第一阶段主要是样品中的结合水以及部分熔点低的壁材组分损失,导致质量下降10.1%;第二阶段主要为微胶囊结构被破坏,沙棘籽油暴露而氧化分解,导致质量损失28.8%;第三个阶段的质量变化主要来自于壁材的进一步热分解。根据微胶囊中沙棘籽油的分解温度范围可知,沙棘籽油微胶囊表现出了较好的热稳定性。

## 2.6 沙棘籽油微胶囊化前后脂肪酸组成(见表5)

表5 沙棘籽油微胶囊化前后脂肪酸组成及相对含量 %

脂肪酸	微胶囊化前	微胶囊化后
肉豆蔻酸 C14:0	0.09 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.04 <sup>b</sup>
十五烷酸 C15:0	0.08 ± 0.00	0.11 ± 0.00
棕榈酸 C16:0	8.37 ± 0.04 <sup>a</sup>	8.95 ± 0.12 <sup>b</sup>
棕榈油酸 C16:1	0.31 ± 0.02	0.32 ± 0.01
硬脂酸 C18:0	3.13 ± 0.02 <sup>a</sup>	3.53 ± 0.01 <sup>b</sup>
油酸 C18:1(n9)	22.52 ± 0.00	22.53 ± 0.19
异油酸 C18:1(n7)	0.14 ± 0.02	0.15 ± 0.01
亚油酸 C18:2(n6)	36.73 ± 0.00 <sup>a</sup>	35.91 ± 0.17 <sup>b</sup>
花生酸 C20:0	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.00
α-亚麻酸 C18:3(n3)	28.21 ± 0.04 <sup>a</sup>	27.77 ± 0.01 <sup>b</sup>
二十碳一烯酸 C20:1(n8)	0.16 ± 0.00	0.16 ± 0.02
二十碳三烯酸 C20:3(n3)	0.16 ± 0.00	0.20 ± 0.05
SFA	11.78	12.96
MUFA	23.12	23.16
PUFA	65.10	63.88

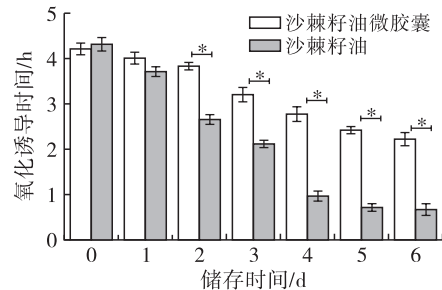
注:表中同行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

由表5可知,沙棘籽油中不饱和脂肪酸含量极为丰富,其中α-亚麻酸含量高达28.21%,可作为ω-3脂肪酸的良好来源。对比微胶囊化前后沙棘籽油脂肪酸组成的变化可知,多不饱和脂肪酸含量降低了1.9%,而单不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸含量略有升高。在微胶囊化过程中,喷雾干燥的瞬时高温可能导致部分多不饱和脂肪酸被氧化生成单不饱和脂肪酸或饱和脂肪酸。总体来说,微胶囊化对沙棘籽油脂肪酸组成及相对含量并未产生较大影响。

## 2.7 沙棘籽油微胶囊的氧化诱导时间(见图6)

由图6可见,最初沙棘籽油的氧化稳定性略高于微胶囊中的沙棘籽油,其原因可能是喷雾干燥过程中瞬时的高温造成微胶囊表面的油脂发生了轻微氧化。但随着高温储存时间的延长,经微胶囊包埋

的沙棘籽油氧化稳定性变化明显小于未包埋的沙棘籽油。60℃储存6d,未包埋的沙棘籽油氧化诱导时间为0.67h,而微胶囊化后其氧化诱导时间为2.22h,可见沙棘籽油的氧化稳定性经过微胶囊包埋后提高至3倍以上,显著提高了沙棘籽油的抗氧化性。



注:图中\*表示相同储存时间下两样品差异显著( $P < 0.01$ )。

图6 加速储存过程中沙棘籽油氧化诱导时间的变化

## 3 结论

本实验通过复合壁材对沙棘籽油进行包埋,在单因素实验的基础上利用正交实验优化沙棘籽油微胶囊的制备工艺条件,得到最佳的包埋条件为:壁材(CAS与MD)质量比1:1,壁材与芯材质量比2:1,固形物含量20%。最佳条件下制得的沙棘籽油微胶囊包埋率为96.15%,平均粒径为372nm,且分布均匀。沙棘籽油微胶囊具有较好的热稳定性,在正常加工范围内不会发生热分解。微胶囊化对沙棘籽油中的不饱和脂肪酸没有明显影响,经过包埋的沙棘籽油氧化稳定性明显优于未包埋的沙棘籽油。沙棘籽油进行微胶囊化后,不仅可以有效保留其营养成分,且能在很大程度上延缓氧化。

## 参考文献:

- [1] ZHENG L, SHI L K, ZHAO C W, et al. Fatty acid, phytochemical, oxidative stability and in vitro antioxidant property of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) oils extracted by supercritical and subcritical technologies [J]. LWT - Food Sci Technol, 2017, 86:507-513.
- [2] 郑满荣,吕晓玲,王建新,等. 3种沙棘油的主要成分及抗氧化能力比较[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(8): 24-30.
- [3] YANG R, ZHANG L, LI P, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 74: 26-32.
- [4] SURYAKUMAR G, GUPTA A. Medicinal and therapeutic potential of sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) [J]. J Ethnopharmacol, 2011, 138(2): 268-278.

(下转第60页)

- tor: possibilities and limitations of the fatty acid and fatty alcohol systems[J]. *Food Res Int*, 2007, 40(9): 1185–1193.
- [3] CHEN C H, TERENTJEV E M. Aging and metastability of monoglycerides in hydrophobic solutions [J]. *Langmuir*, 2009, 25:6717–6724.
- [4] 刘日斌,李园,卢婉仪,等. 利用蒸馏单硬脂酸甘油酯制备玉米胚芽油基凝胶油的研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(1):66–69.
- [5] BIN M S, DANTHINE S, BROWN A, et al. Phytosterols – induced viscoelasticity of oleogels prepared by using monoglycerides[J]. *Food Res Int*, 2017, 100(1):832–840.
- [6] 杨丽君,孟宗,李进伟,等. 分子蒸馏单甘酯含量对花生油基有机凝胶油性质的影响[J]. *中国油脂*, 2014, 39(4):54–58.
- [7] 代小容,张宝勇. 脂肪和猪油的食用价值[J]. *肉类研究*, 2008(7):65–68.
- [8] YAMAGISHI K, LSO H, KOKUBO Y, et al. Dietary intake of saturated fatty acids and incident stroke and coronary heart disease in Japanese communities: the JPHC study[J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(16):1225–1232.
- [9] ARO A, JAUHAINEN M, PARTANEN R, et al. Stearic acid, *trans* fatty acids, and dairy fat: effects on serum and lipoprotein lipids, apolipoproteins, lipoprotein (a), and lipid transfer proteins in healthy subjects [J]. *Am J Clin Nutr*, 1997, 65(5):1419–1426.
- [10] IIDA H, ITOH D, MINOWA S, et al. Hydrogenation of soybean oil over various platinum catalysts: effects of support materials on *trans* fatty acid levels [J]. *Catal Commun*, 2015, 62: 1–5.
- [11] 侯万国,孙德军,张春光. 应用胶体化学[M]. 北京:科学出版社,1998:51.
- [12] 朱小勇,孟宗,李进伟,等. 凝胶剂种类对凝胶油物性及结晶形态的影响研究 [J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(10):37–43.
- [13] MENG Z, QI K Y, GUO Y, et al. Macro – micro structure characterization and molecular properties of emulsiontemplated polysaccharide oleogels [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 77: 17–29.
- [14] 张宁,杨雪,滕英来,等. 三聚甘油脂肪酸酯对甘油二酯结晶特性的影响 [J]. *现代食品科技*, 2016, 32(3): 48–55.
- [15] MARTINIS S J S. Physical characterization of crystalline networks formed by binary blends of waxes in soybean oil [J]. *Food Res Int*, 2016, 89: 245–253.
- [16] 王晓晨,杨雪,陈琼,等. 大豆油基甘油二酯凝胶油的制备与表征研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(1):60–65.
- [17] 殷俊俊,马传国,王伟,等. 不同植物油对  $\gamma$ -谷维素与  $\beta$ -谷甾醇有机凝胶的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(5):87–91.
- [18] 李丹,赵月,李婷婷,等. 油脂品种对肉桂酸基油脂凝胶形成及性质的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 9–14.
- [19] 高宁宁,唐年初,赵晨伟. 玉米蜡含量对大豆油基凝胶油性质的影响 [J]. *中国油脂*, 2016, 41(8):31–36.
- (上接第 16 页)
- [5] 刘君丽. 沙棘功能性食品的开发研究现状 [J]. *食品安全导刊*, 2017, 33(6): 61–62.
- [6] PISOSCHI A M, POP A, CIMPEANU C, et al. Nanoencapsulation techniques for compounds and products with antioxidant and antimicrobial activity—a critical view [J]. *Eur J Med Chem*, 2018, 157:1326–1345.
- [7] 刘光宪,周巾英,祝水兰,等. 沙棘籽油微胶囊的制备及其性质研究 [J]. *食品与机械*, 2017, 33(8): 194–197.
- [8] 刘成祥,王力,苏建辉,等. 牡丹籽油微胶囊的制备及特性研究 [J]. *中国油脂*, 2016, 41(11): 12–16.
- [9] 李晓龙. 粉末油脂氧化稳定性分析方法的评估[D]. 江苏无锡:江南大学, 2016.
- [10] 刘慧敏. 不同植物油微量成分与抗氧化能力的相关性研究[D]. 江苏无锡:江南大学, 2015.
- [11] DI G L, SALGADO P R, MAURI A N. Encapsulation of fish oil in soybean protein particles by emulsification and spray drying [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 87: 891–901.
- [12] CHANG C, VARANKOVICH N, NICKERSON M T. Microencapsulation of canola oil by lentil protein isolate – based wall materials [J]. *Food Chem*, 2016, 212:264–273.
- [13] 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*, 2012, 6(6): 1561–1569.
- [14] CARVALHO A G S, SILVA V M, HUBINGER M D. Microencapsulation by spray drying of emulsified green coffee oil with two – layered membranes [J]. *Food Res Int*, 2014, 61:236–245.
- [14] CARNEIRO H C F, TONON R V, GROSSO C R F, et al. Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials [J]. *J Food Eng*, 2013, 115(4): 443–451.
- [16] HOGAN S A, BRIAN F M, DOLORES O, et al. Microencapsulating properties of sodium caseinate [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(4):1934–1938.
- [17] ZHOU D, PAN Y, YE J, et al. Preparation of walnut oil microcapsules employing soybean protein isolate and maltodextrin with enhanced oxidation stability of walnut oil [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2017, 83:292–297.