

沙棘果油微胶囊化制备工艺的优化及其表征

石佳¹, 于明晓¹, 徐昊¹, 赵伟学¹, 徐磊¹, 张国坤²
(1.美泰科技(青岛)股份有限公司, 山东青岛 266400;
2.中国农业科学院特产研究所, 北京 110032)

摘要: 为研究混合壁材及乳化剂对沙棘果油微胶囊包埋效果及稳定性的影响, 本文以沙棘果油为芯材, 以酪蛋白酸钠和变性淀粉(辛烯基琥珀酸淀粉钠)为混合壁材, 单双硬脂酸甘油酯为乳化剂, 麦芽糊精为填充剂, 柠檬酸钾为缓冲盐, 通过喷雾干燥法制备 50% 载油率的沙棘果油微胶囊。在单因素实验的基础上, 以酪蛋白酸钠添加量、变性淀粉添加量、乳化剂添加量为实验因素, 采用 Box-Behnken 法设计三因素三水平试验进行优化, 确定微囊粉的最佳包埋效果。结果表明, 所得的回归模型具有高度的显著性($P < 0.0001$), 方程对试验拟合较好, 在酪蛋白酸钠添加量 8%、变性淀粉添加量 16%、乳化剂添加量 2% 条件下, 制备得到的沙棘果油微囊粉包埋率最大, 可以达到 91.6%; 扫描电镜观察微胶囊粉表面圆润无裂痕, 马尔文激光粒度分析仪测定复原乳粒径 < 800 nm, 通过油脂氧化自动分析仪进行油脂氧化诱导期分析, 对照组沙棘果油氧化诱导期为 7 h, 试验组沙棘果油微囊粉氧化诱导期为 40 h, 表明沙棘果油微囊粉稳定性强, 不易氧化变质, 货架期较长。

关键词: 沙棘果油; 微胶囊; 响应面; 包埋效果; 稳定性

Optimization and Characterization of Microencapsulation Technology for Seabuckthorn Fruit Oil

SHI Jia¹, YU Ming-xiao¹, XU Hao¹, ZHAO Wei-xue¹, XU Lei¹, ZHANG Guo-kun²
(1.Meitek Technology(Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266400, China;
2.Institute of Special Animal and Plant Sciences of CAAS, Beijing 110032, China)

Abstract: In order to study the effect of mixed wall materials and emulsifiers on the embedding effect and stability of seabuckthorn fruit oil microcapsules, the seabuckthorn fruit oil was used as core material, with sodium caseinate and modified starch (octyl succinic acid sodium starch) as mixed wall material, single and double stearic acid glyceride as emulsifier, maltodextrin as filling agent, potassium citrate as buffer salt, and seabuckthorn oil microcapsules with 50% oil loading rate prepared by spray drying method. Based on the single factor experiment, taking the content of sodium caseinate, modified starch and emulsifier as the experimental factors, box Behnken method was used to design three factors and three level experiment to optimize the response surface and determine the best embedding effect. The results showed that the regression model was highly significant ($P < 0.0001$). The equation fitted the experiment well. Under the conditions of 8% sodium caseinate, 16% modified starch and 2% emulsifier, the embedding rate of seabuckthorn oil microcapsule powder was the highest, which could reach 91.6%. The surface of microencapsulated powder was round and free of cracks by SEM. The particle size of reconstituted milk was less than 800 nm by Malvern laser particle size analyzer. The induction period of oil oxidation was analyzed by oil oxidation automatic analyzer. The oxidation induction period of seabuckthorn fruit oil in the control group was 7 h, and the oxidation induction period of seabuckthorn fruit oil microcapsule powder in the test group was 40 h, indicating that seabuckthorn fruit oil microcapsule powder had strong stability, was not easy to oxidize and deteriorate, and has a long shelf life.

Key words: seabuckthorn fruit; microcapsule; response surface; embedding effect; stability

中图分类号: TS221 文献标识码: B 文章编号: 1002-0306(2020)07-0173-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.029

引文格式: 石佳, 于明晓, 徐昊, 等. 沙棘果油微胶囊化制备工艺的优化及其表征[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 173-177, 184.

沙棘果油是由棕榈酸、棕榈烯酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸等 34 种脂肪酸组成, 比沙棘籽油中

脂肪酸种类多 10 余种,其中不饱和脂肪酸含量高达 60% 以上,沙棘果油中含有丰富的维生素 A、维生素 E 和微量元素(硒、镁、锌、铁、锰等),具有很好的抗菌、抗氧化、抗肿瘤的功[1-4]。但沙棘果油难溶于水,稳定性差,较沙棘籽油更易氧化变质,不利于储藏及运输,从而限制了其应用领域及市场价值。

目前,对沙棘果油的研究主要集中于油脂提取、脂肪酸组成分析及功能特性研究等方面[5-8]。Gutiérrez L F 等[9]以正丁烷为萃取溶剂,研究风干的沙棘果与冷冻干燥的沙棘果油脂得率分别为 35.9% 和 17.1%,表明风干法更易破坏细胞结构,有利于细胞中油脂溶出。薄海波等[1]利用气相色谱-质谱法定性、定量鉴定了沙棘果油脂肪酸组成及各成分含量,但对提高沙棘果油微胶囊包埋效果及其稳定性方面研究鲜有报道。

本试验以沙棘果油为芯材,柠檬酸钾为缓冲盐,单双硬脂酸甘油酯为乳化剂,酪蛋白酸钠和变性淀粉为混合壁材,麦芽糊精为填充剂,利用喷雾干燥技术制备 50% 载油量的沙棘果油微囊粉,采用响应面研究酪蛋白酸钠添加量、变性淀粉添加量、乳化剂添加量对沙棘果油微囊粉包埋效果的影响,制备出包埋效果好、稳定性高的微囊粉,为沙棘果油的开发和应用提供理论和应用依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

沙棘果油 青海康普生物科技有限公司提供;酪蛋白酸钠 恒天然(中国)有限公司;单双硬脂酸甘油酯 河南正通食品科技有限公司;麦芽糊精 保龄宝生物股份有限公司;柠檬酸钾 潍坊英轩实业有限公司;变性淀粉(辛烯基琥珀酸淀粉钠) 国民淀粉化学(上海)有限公司。

BS223S 型电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司;HHS-11-2 电热恒温水浴锅 上海博迅实业有限公司;PHS-3C PH 计 上海雷磁仪器厂;高速剪切机 弗鲁克流体机械制造有限公司;SRH60-70 高压均质机 上海申鹿均质机有限公司;OXITEST 油脂氧化分析仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 沙棘果油微胶囊的制备 将一定添加量的酪蛋白酸钠、一定添加量的变性淀粉、1% 柠檬酸钾和填充剂加入到 80 ℃ 蒸馏水中,用搅拌机搅拌至完全溶解,制得水相;再将溶有一定添加量的单双硬脂酸甘油酯的沙棘果油缓慢加入水相中,高速剪切机转速为 2000 r/min 的条件下混合 15 min,得到预乳液;将预乳液经高压均质机乳化后进行喷雾干燥(高压均质机两级压力分别为 8 MPa/40 MPa,喷雾干燥进料速率 27 r/min,进风温度 180 ℃,出风温 85 ℃[10]),得沙棘果油微胶囊。

1.2.2 单因素实验 分别考察酪蛋白酸钠添加量(3%、6%、9%、12%、15%)、变性淀粉添加量(10%、15%、20%、25%、30%)、单双硬脂酸甘油酯添加量(0%、1%、2%、3%、4%) 3 个因素对沙棘果油包埋率的影响。研究某一单因素影响时,其他条件取固定

值,分别为酪蛋白酸钠添加量 9%、变性淀粉添加量 15%、乳化剂添加量 2%。

1.2.3 Box-Behnken 实验设计 在单因素实验基础上,选取酪蛋白酸钠添加量、变性淀粉添加量、单双硬脂酸甘油酯添加量三个因素进一步优化,按照 Box-Behnken 实验设计因素和水平,以沙棘果油微胶囊包埋率为指标,通过响应面分析确定最优提取条件。

表 1 Box-Behnken 实验因素及水平

Table 1 experimental factors and levels of Box-Behnken

水平	因素		
	X ₁ 酪蛋白酸钠 添加量(%)	X ₂ 变性淀粉 添加量(%)	X ₃ 乳化剂 添加量(%)
-1	6	10	1
0	9	15	2
1	12	20	3

1.2.4 包埋率的测定

1.2.4.1 微胶囊表面含油量的测定 准确称取 1.000 g(精确到 0.001 g)样品置于锥形瓶中,加入石油醚(30~60 ℃)浸泡提取 5 min 后,用滤纸过滤样品,并用石油醚洗涤锥形瓶和滤纸,然后在 80 ℃ 温度条件下烘干,测定油脂的质量,所得值即为 1 g 样品的表面含油量[11]。

1.2.4.2 微胶囊总含油量测定 准确称取 1 g(精确到 0.001 g)样品,置于锥形瓶中加 20 mL 热水,使样品充分溶解后加入石油醚(30~60 ℃)充分萃取 2 次,并用石油醚洗涤锥形瓶和滤纸,合并萃取液,然后在 105 ℃ 条件下烘干,测定油脂的质量,所得值为 1 g 样品的总含油量[12-13]。

包埋率(%) = (样品中总含油量 - 表面含油量) / 样品中总含油量 × 100

1.2.5 沙棘果油微囊粉的表面形态观察 用扫描电子显微镜观察微囊粉末油脂的表面形态结构。加速电压为 2 kV,放大倍数为 1200 倍。

1.2.6 油脂氧化稳定性的测定 用油脂氧化分析仪进行测定,准备样品 5 g,将样品放入样品盖中,使用两个空的样品托盘放置在底层,将放有样品的样品盖至于顶层,之后放入样品槽中,密封。在实验温度 90 ℃、氧压 6 Bar 条件下,测定氧化诱导期。

1.3 数据处理方法

采用 Design-expert 和 Box-Behnken 软件进行回归模型建立和响应面分析[14]。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 酪蛋白酸钠添加量对沙棘果油包埋率的影响 由图 1 可知,逐渐增加酪蛋白酸钠的添加量,沙棘果油包埋率呈现先升高后降低的趋势,在酪蛋白酸钠添加量为 9% 时,沙棘果油的包埋效果最好,包埋率可达 91.7%;但随着酪蛋白酸钠添加量进一步增加,在乳化的过程中,由于温度较高,使过多的疏水氨基酸残基被暴露,蛋白之间的相互作用增强,而发生聚集,使其界面的最佳包埋效应遭到破坏,影

响乳化液的稳定性,致使沙棘果油的包埋率降低。

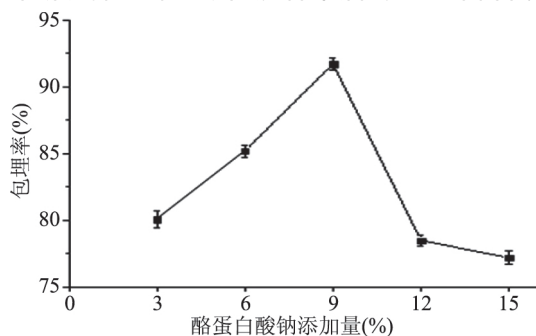


图1 酪蛋白酸钠添加量对沙棘果油包埋率的影响

Fig.1 Effect of sodium caseinate on the embedding rate of seabuckthorn fruit oil

2.1.2 变性淀粉添加量对沙棘果油包埋率的影响 由图2可知,变性淀粉添加量在10%~20%之间时,沙棘果油的包埋率随着变性淀粉的添加量呈现先增后减的趋势;当变性淀粉添加量大于20%时,沙棘果油包埋率趋于稳定,可能在此条件下,壁材的乳化性能及乳液的稳定性趋于平稳,再增加变性淀粉的添加量只会降低喷雾干燥的效率以及成本的浪费,所以选择变性淀粉添加量10%、15%、20%三个水平作为响应面试验的考察因素。

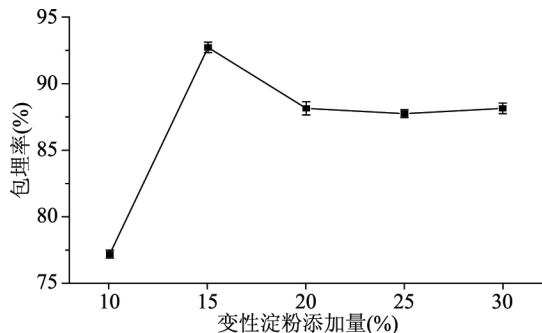


图2 变性淀粉添加量对沙棘果油包埋率的影响

Fig.2 Effect of modified starch on the embedding rate of seabuckthorn fruit oil

2.1.3 乳化剂添加量对沙棘果油包埋率的影响 由图3可知,乳化剂添加量在2%时,沙棘果油的包埋率最高。当乳化剂<2%时,随着乳化剂的增加沙棘果油的包埋率不断提高,这可能是添加乳化剂后,能够使油滴在乳液中分布更为均匀,使乳液更为稳定。当乳化剂添加量>2%时,随着乳化剂的增加沙棘果油包埋率呈下降趋势,这可能是由于添加过多的乳化剂容易使乳液在喷雾干燥过程中延迟干燥,产生回潮现象,造成微粒之间相互粘连,容易造成油脂析出。

2.2 响应面实验结果与分析

2.2.1 回归模型的建立及显著性检验 采用 Design-expert 软件通过回归对表2数据进行回归拟合^[15-16],实验设计及结果见表2。

沙棘果油微胶囊包埋率的响应分析实验根据 Box-Behnken 设计进行了17组实验,其中5组为中心点重复实验。通过 Design-expert 软件对表2数据进行回归拟合,得到包埋率的回归方程为:

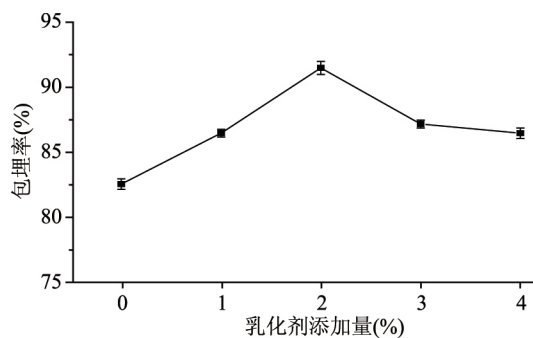


图3 乳化剂添加量对沙棘果油包埋率的影响

Fig.3 Effect of emulsifier on the embedding rate of seabuckthorn fruit oil

表2 Box-Behnken 实验设计结果

Table 2 Experimental design results of Box-Behnken

试验号	X ₁	X ₂	X ₃	Y: 包埋率 (%)
1	-1	-1	0	75.32
2	1	-1	0	79.22
3	-1	1	0	87.21
4	1	1	-1	76.82
5	-1	0	-1	87.87
6	1	0	-1	81.19
7	-1	0	1	86.56
8	1	0	1	86.88
9	0	0	-1	87.65
10	0	1	-1	89.33
11	0	-1	1	87.22
12	0	1	1	83.52
13	0	0	0	91.22
14	0	0	0	92.31
15	0	0	0	91.82
16	0	0	0	91.83
17	0	0	0	92.15

$$Y = 91.76 - 1.58X_1 + 2.52X_2 + 1.52X_3 - 3.51X_1X_2 + 1.82X_1X_3 - 4.40X_2X_3 - 5.03X_1^2 - 6.84X_2^2 - 1.31X_3^2$$

对模型进行方差分析,结果见表3。由表3可以看出,实验选用的模型具有高度的显著性($P < 0.01$),表明该模型极显著;而失拟项的 $P > 0.05$,说明回归方程对于实际情况来说较吻合,实验误差比较小,故可用回归方程对实验结果进行分析和预测。模型的 R_{Adj} 为0.9819, R^2 为0.9921,说明该模型能解释98.19%的响应值,仅有总变异的1.81%不能用此模型来解释,说明该模型拟合程度良好。用此模型对沙棘果油微胶囊的包埋率进行优化是合适的。

2.2.2 响应面图和等高线图分析 各因素对沙棘果油包埋率的响应面图和等高线图如图4~6所示。在单因素实验后所选的范围内存在极值,是响应面的最高点。响应面图坡度的陡峭程度直观反映了各因素对响应面的影响,两两因素均有交互作用,等高线形状反映了交互效果的强弱,椭圆形表示交互作用显著,圆形则正好相反^[17]。

由图4可以看出酪蛋白酸钠添加量和变性淀粉添加量对微胶囊包埋率影响的响应面图呈椭圆形,

表3 回归方程方差分析
Table 3 Analysis of variance for
the fitted regression equation

方差分析	平方和	自由度	均方	F 值	P
模型	461.79	9	51.31	97.36	<0.0001
X_1	18.04	1	18.04	34.23	0.0006
X_2	32.81	1	32.81	62.26	<0.0001
X_3	15.3	1	15.3	29.04	0.001
$X_1 X_2$	41.06	1	41.06	77.92	<0.0001
$X_1 X_3$	13.98	1	13.98	26.53	0.0013
$X_2 X_3$	47.88	1	47.88	90.86	<0.0001
X_1^2	91.52	1	91.52	173.66	<0.0001
X_2^2	153.44	1	153.44	291.17	<0.0001
X_3^2	5.39	1	5.39	10.23	0.0151
残差	3.69	7	0.53		
失拟项	2.99	3	1	5.71	0.0628
纯误差	0.7	4	0.17		
总和	465.48	16			

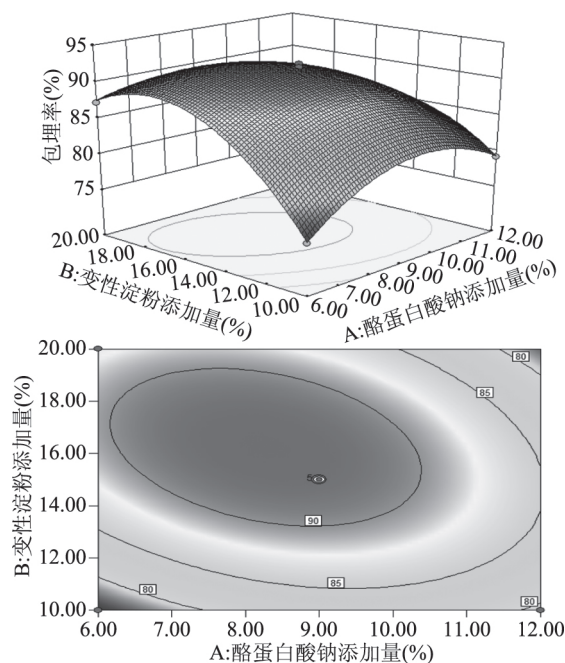


图4 酪蛋白酸钠添加量和变性淀粉添加量
对微胶囊包埋率影响响应面图

Fig.4 Response surface of the effect of the amount of
sodium caseinate and modified starch
on the embedding rate of microcapsules

说明两者对沙棘果油包埋率的影响较为显著。当酪蛋白酸钠添加量一定时,变性淀粉增加可以提高沙棘果油微胶囊的包埋率。当变性淀粉一定时,随着酪蛋白酸钠添加量的增加包埋率也有所提高,当酪蛋白酸钠添加量超过 9.5% 时,又呈下降趋势。

由图 5 可以看出酪蛋白酸钠和乳化剂对微胶囊包埋率影响的响应面图呈椭圆形,说明两因素交互作用对微胶囊包埋率影响显著。主要是由于酪蛋白酸钠在较高温度时,蛋白发生变形导致蛋白质分子间的相互作用增强,从而发生聚集,使其界面的最佳包埋效应遭到破坏,影响乳化液的稳定性,致使沙棘

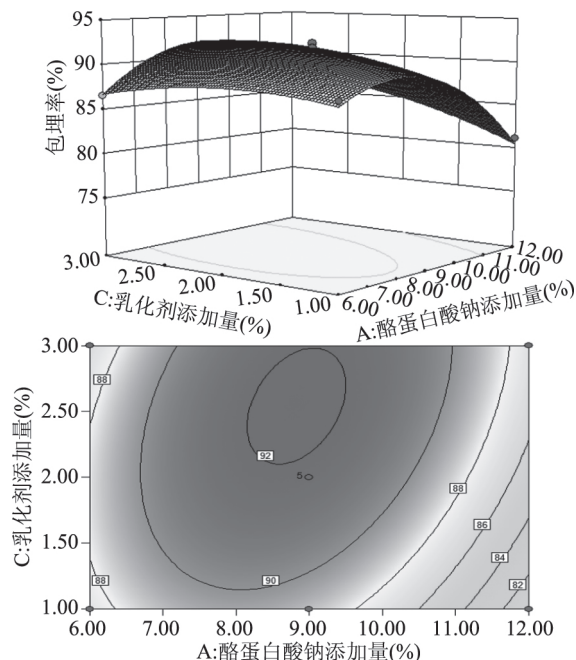


图5 酪蛋白酸钠添加量和乳化剂添加量
对微胶囊包埋率影响响应面图

Fig.5 Response surface of the effect of the amount of sodium
caseinate and emulsifier on the embedding rate of microcapsules

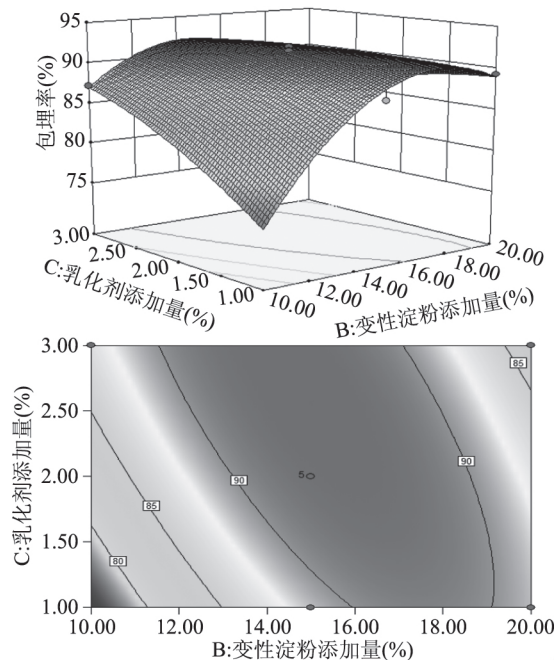


图6 变性淀粉添加量和乳化剂添加量
对微胶囊包埋率影响响应面图

Fig.6 Response surface of the effect of the amount of modified
starch and emulsifier on the embedding rate of microcapsules
果油的包埋率降低。同时添乳化剂会影响喷雾干燥过程中微胶囊的干燥效果,导致微胶囊产生回潮现象,造成微粒之间相互粘连,容易造成油脂析出^[15]。

同样,由图 6 可以看出变性淀粉和乳化剂相互作用对微胶囊包埋率影响的响应面图呈椭圆形,说明两因素交互作用对微胶囊包埋率影响显著。当变性淀粉添加量一定时,增加乳化剂可以提高沙棘果油微胶囊的包埋率。当乳化剂一定时,随着变性淀

粉添加量的增加包埋率也有所提高,当乳化剂添加量超过 15% 时,又呈下降趋势。

根据 Box - Behnken 实验所得的结果,利用 Design Expert 软件得到最佳工艺条件:酪蛋白酸钠添加量为 8.25%,变性淀粉添加量为 16.27%,乳化剂添加量为 1.98%,此条件下,微胶囊包埋率最大,可以达到 $92.27\% \pm 0.09\%$ 。为验证模型预测的准确性,同时考虑便于操作,将微胶囊工艺条件修正为:酪蛋白酸钠添加量为 8%,变性淀粉添加量为 16%,乳化剂添加量为 2%。用修正后的工艺条件进行 3 次验证实验,得到沙棘果油微囊粉平均包埋率在 $91.6\% \pm 0.05\%$,与方程得到的预测值相对标准偏差为 0.97%,表明该模型预测性好,具有很好的适用效果。

2.3 沙棘果油微囊粉包埋效果及稳定性分析

2.3.1 包埋效果 采用扫描电镜对微胶囊的形态进行观察,由图 7 可以看出其颗粒呈圆形,无裂缝;用马尔文激光粒度仪测定微胶囊粉复原乳粒径分布(图 8),复原乳平均粒径为 795 nm,说明微胶囊粒径较小,复原乳均一,沙棘果油微囊粉的包埋效果非常理想。

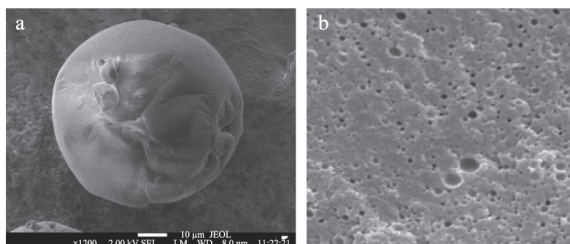


图 7 沙棘果油微囊粉扫描电镜图及粒径分布图

Fig.7 Scanning electron micrograph of seabuckthorn fruit oil microcapsule powder

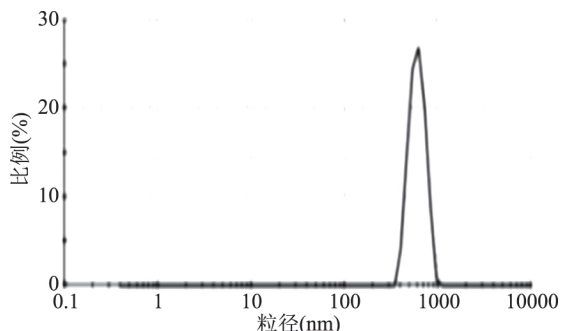


图 8 沙棘果油微胶囊粉复原乳液粒径分布图

Fig.8 Particle size distribution of reconstituted emulsion of seabuckthorn fruit oil microcapsule powder

采用油脂氧化分析仪测定油脂氧化稳定性,由图 9 可以发现,对照组沙棘果油的氧化诱导期时间较短,大约在 7 h 左右,且油脂氧化的速率较快;而试验组沙棘果油微囊粉的氧化诱导期时间较长,能够达到 36 h 以上,油脂氧化速率较为缓慢,说明与沙棘果油相比,沙棘果油微囊粉的抗氧化性能强,稳定性较好,不易氧化变质^[18-19],通过微胶囊包埋技术可以大大延长沙棘果油的货架期和储藏期。

3 结论

本研究以沙棘果油微胶囊包埋率为主要目标,通过响应面法分析优化表明,酪蛋白酸钠添加量、变

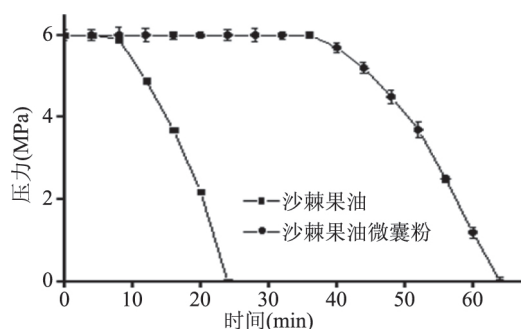


图 9 油脂氧化稳定性测试结果

Fig.9 Test results of oil oxidation stability

性淀粉添加量、乳化剂添加量对沙棘果油微胶囊包埋率的影响显著,修正后工艺条件为酪蛋白酸钠添加量 8%、变性淀粉添加量 16%、乳化剂添加量 2%,此条件下制备的沙棘果油微囊粉包埋率可达 91.6%,相对标准偏差 $<1\%$,模型设计合理。同时,此工艺获得的沙棘果油微囊粉表面光滑无裂痕,氧化诱导期时间长达 36 h,说明制备的沙棘果油微囊粉具有很好的包埋效果和稳定性,便于储藏及运输,为沙棘果油进一步开发和应用提供理论和应用依据。

参考文献

- [1]薄海波,秦榕.沙棘果油与沙棘籽油脂肪酸成分对比研究[J].食品科学,2008,29(5):378-381.
- [2]臧茜茜,邓乾春,从仁怀,等.沙棘油功效成分及药理功能研究进展[J].中国油脂,2015,40(5):76-81.
- [3]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.
- [4]魏贞伟,邵弘,王俊国,等.超临界 CO_2 萃取沙棘籽油及热敏性物质分析[J].食品科学,2012,33(24):97-100.
- [5]徐海萍.亚麻籽胶为壁材制备沙棘油微胶囊研究[J].青海师范大学学报:自然科学版,2012,28(2):48-51.
- [6]Sriti J, Wannes W A, Talou T, et al. Lipid, fatty acid and tocopherol distribution of coriander fruit's different parts [J]. Industrial Crops and Products, 2010, 31: 294-300.
- [7]Dulic F V. Fatty acids in berry lipids of six sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L., subspecies *carpatica*) cultivars grown in Romania [J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6(1): 106-117.
- [8]郑宏伟,苏海建,张帅,等.沙棘果油的超临界 CO_2 萃取及其在卷烟中的应用研究[J].安徽农业科学,2015,43(4):286-288.
- [9]Gutiérrez L F, Ratti C, Belkacemi K. Effects of drying method on the extraction yields and quality of oils from quebec sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) seeds and pulp [J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 896-904.
- [10]刘楠楠.喷雾干燥法制备芝麻油微胶囊的研究[J].食品与机械,2013(1):219-222.
- [11]付红军,彭湘莲,钟海雁.喷雾干燥法制备山苍子油微胶囊的研究[J].食品与机械,2016,32(11):187-190.
- [12]徐振波,梁军,陈丽丽,等.微胶囊化粉末油脂的研究与

(下转第 184 页)

床医药文献电子杂志 2019 6(6):195-196.

[5] Nogués X, Martínez - Laguna D. Update on osteoporosis treatment [J]. Medicina Clínica (English Edition), 2018, 150 (12): 479-486.

[6] Sims N A, Vrahnas C. Regulation of cortical and trabecular bone mass by communication between osteoblasts, osteocytes and osteoclasts [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2014, 561: 22-28.

[7] Komori T. Regulation of osteoblast and odontoblast differentiation by RUNX2 [J]. Journal of Oral Biosciences, 2010, 52(1): 22-5.

[8] Ralston S H. Bone structure and metabolism [J]. Medicine, 2017 45(9): 560-564.

[9] Matsuo K, Irie N. Osteoclast-osteoblast communication [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2008, 473 (2): 201-209.

[10] 张振忠, 马淑伟, 郑明驿, 等. 卵黄脂磷蛋白的纯化鉴定及其夹心 ELISA 的建立 [J]. 中国水产科学, 2018, 25(1): 53-59.

[11] 许艳萍. 大黄鱼鱼卵磷脂制备、性质及降血脂功能研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.

[12] 陈银. 四种鱼卵中卵黄糖蛋白的提取及结构鉴定 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.

[13] 贺敏. 鱼卵唾液酸糖蛋白调控成骨细胞和破骨细胞分化及作用机制的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

[14] Xia G H, Wang S S, He M, et al. Anti-osteoporotic activity of sialoglycoproteins isolated from the eggs of *Carassius auratus* by promoting osteogenesis and increasing OPG/RANKL ratio [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 15: 137-150.

[15] 罗凯, 黄秀芳, 周毅峰, 等. 响应面法优化复合酶法提取碎米荠多糖工艺及其抗氧化活性 [J]. 食品科学, 2017, 38 (4): 237-142.

[16] 渡部和哉, 宋美玉, 佐内勇亮, 等. 蛋黄来源的骨代谢改善物质-水解蛋黄粉的开发 [J]. 中国食品添加剂, 2011(1): 187-90.

[17] 范宏亮, 赵玲玲, 李君, 等. 微波辅助提取工艺对大豆种皮水溶性多糖-蛋白乳状液乳化活性及表面电位的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(20): 49-56.

[18] Peel N. Disorders of bone metabolism [J]. Surgery (Oxford), 2018, 36(1): 15-20.

[19] Meijie L, Ruihai W, Yan L, et al. Effect of esculetin on bone metabolism in ovariectomized rats [J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2018, 38(6): 896-903.

[20] Ren J, Chakrabarti S, Wu J. Phosvitin and its hydrolysate promote differentiation and inhibit TNF- α induced inflammation in MC3T3-E1 cells via ERK and AKT pathways [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 53: 259-265.

[21] Jie Y, Li X, Cai Z, et al. Phosphorylation of phosvitin plays a crucial effects on the protein - induced differentiation and mineralization of osteoblastic MC3T3 - E1 cells [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 118: 1848-1854.

[22] Mada S B, Reddi S, Kumar N, et al. Casein - derived antioxidative peptide prevents oxidative stress - induced dysfunction in osteoblast cells [J]. Pharma Nutrition, 2018, 6(4): 169-179.

[23] Lai M, Jin Z, Su Z. Surface modification of TiO₂ nanotubes with osteogenic growth peptide to enhance osteoblast differentiation [J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 73: 490-497.

[24] An J, Yang H, Zhang Q, et al. Natural products for treatment of osteoporosis: The effects and mechanisms on promoting osteoblast-mediated bone formation [J]. Life Sciences, 2016, 147: 46-58.

[25] Zhang Y, Xiong Y, Zhou J, et al. FoxO1 expression in osteoblasts modulates bone formation through resistance to oxidative stress in mice [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 503(3): 1401-1408.

[26] 介怡琳, 陈婵, 刘晴丽, 等. 卵黄高磷蛋白调控生物矿化的研究进展 [J]. 食品科学, 2016, 37(9): 220-226.

(上接第 177 页)

应用进展 [J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 392-395.

[13] 范方宇, 董选刚, 常艳琼, 等. 喷雾干燥法制备茶油微胶囊的研究 [J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2013, 34(6): 73-76.

[14] 张维, 李雪雁, 张秀兰, 等. 响应面分析法优化菊芋渣中蛋白的提取工艺 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(1): 305-307.

[15] 包珍, 鲁青, 张良, 等. 响应面法优化油茶籽油微胶囊喷雾干燥工艺的研究 [J]. 粮油食品科技, 2019, 27(4): 19-23.

[16] 卢宇, 阿荣, 张园园, 等. 响应面法优化藜麦多酚提取工艺的研究 [J]. 食品工业科技, 2016(12): 311-315.

[17] 郭玉霞, 柴庆伟, 马新付. 响应面法优化沙棘果油水酶复合提取工艺 [J]. 食品工业, 2013, 34(10): 82-84.

[18] 高牡丹, 张喜琦, 冯炜等. 粉末油脂过氧化值测定中油脂提取方法的研究 [J]. 中国油脂, 2019, 44(7): 144-146.

[19] 胡姝敏, 姜冬梅, 刘宝华, 等. 婴儿配方奶粉油脂微胶囊化稳定性的研究 [J]. 中国乳品工业, 2017, 45(3): 9-14.

重要声明

本刊所付稿酬中已包含数字出版(包括镜像、光盘、网络、移动终端及其他新型服务方式)应付的稿酬。作者向本刊投递文章即视为同意我社上述声明。

《食品工业科技》杂志社