

复合凝聚法制备天然椰子油微胶囊

李艳南^{1,2,3}, 宋菲^{2,3}, 王挥^{2,3}, 邓福明^{2,3}, 沈晓君^{2,3}, 吕方方^{1,2,3}, 赵松林^{2,3}

(1. 华中农业大学 食品科学技术学院, 武汉 430070; 2. 中国热带农业科学院 椰子研究所, 海南 文昌 571339;
3. 海南省椰子深加工工程技术研究中心, 海南 文昌 571339)

摘要:以明胶、阿拉伯胶为壁材, 采用复合凝聚法制备天然椰子油微胶囊。用 TG 酶作为固化剂, 以包埋率为主要评价指标, 采用单因素试验和正交试验对天然椰子油微胶囊制备工艺进行优化。重点探讨 pH、壁材质量浓度、芯壁比、反应温度对天然椰子油微胶囊制备的影响, 并分析天然椰子油微胶囊产品的基本性质。结果表明: 天然椰子油微胶囊制备的最佳条件为 pH 3.5、壁材质量浓度 20 g/L、芯壁比 2:1、反应温度 40 ℃, 该条件下制备的天然椰子油微胶囊产品的水分含量(2.88 ± 0.31)%、表面油含量(4.20 ± 0.05)%、包埋率(93.75 ± 0.28)%、平均粒径 413 μm。

关键词:椰子油; 微胶囊; 复合凝聚

中图分类号: TS225.1; TS252.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2018)01-0094-06

Preparation of virgin coconut oil microcapsules by complex coacervation

LI Yannan^{1,2,3}, SONG Fei^{2,3}, WANG Hui^{2,3}, DENG Fuming^{2,3},
SHEN Xiaojun^{2,3}, LÜ Fangfang^{1,2,3}, ZHAO Songlin^{2,3}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Coconut Research Institute of Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences,
Wenchang 571339, Hainan, China; 3. Engineering and Technology Research Center for Coconut Deep
Processing of Hainan Province, Wenchang 571339, Hainan, China)

Abstract: With gelatin and arabic gum as wall materials, virgin coconut oil microcapsules were prepared by complex coacervation. With transglutaminase (TG) as cross-linking agent, and embedding rate as the main evaluation index, the preparation process of virgin coconut oil microcapsules were optimized by orthogonal experiment on the basis of single factor experiment. The effects of pH, mass concentration of wall material, ratio of core material to wall material and reaction temperature on the preparation of virgin coconut oil microcapsules were mainly investigated, and the basic properties of virgin coconut oil microcapsule products were analyzed. The results showed that the optimal preparation conditions of virgin coconut oil microcapsules were obtained as follows: pH 3.5, mass concentration of wall material 20 g/L, ratio of core material to wall material 2:1 and reaction temperature 40 ℃. Under these conditions, the moisture content, surface oil content, embedding rate and average particle size of virgin coconut oil microcapsules were (2.88 ± 0.31)%, (4.20 ± 0.05)%, (93.75 ± 0.28)% and 413 μm, respectively.

Key words: coconut oil; microcapsule; complex coacervation

收稿日期: 2017-09-04; 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 海南省自然科学基金(20163143); 海南省重点研发计划(ZDYF2017129); 948 项目(2016-X40)

作者简介: 李艳南(1994), 女, 硕士研究生, 研究方向为油脂化学(E-mail) 1983299382@qq.com。

通信作者: 赵松林, 研究员(E-mail) 13807610690@126.com。

椰子是海南省最具特色和最重要的经济作物和木本油料作物, 享有“生命树”的美誉。椰子全身都是宝, 具有重要的开发利用价值^[1]。天然椰子油是指以低温离心或酶解技术从新鲜椰肉中获得的 100% 纯天然油脂, 由于没有经过化学和高温处理, 其最大程度保留了椰肉中的功能成分和天然活性成分^[2]。

天然椰子油是典型的月桂酸类油脂,饱和脂肪酸占90%以上,而且以中、短链脂肪酸为主,主要是月桂酸(C12:0)、肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)和硬脂酸(C18:0),不饱和脂肪酸中油酸(C18:1)和亚油酸(C18:2)含量均很低,几乎不含磷脂与其他胶质^[3]。天然椰子油易被人体消化吸收,具有减肥、抗氧化、抗微生物等多种功能^[4]。将天然椰子油添加在婴幼儿奶粉中可增加婴幼儿对钙、镁及氨基酸的吸收^[5]。目前,天然椰子油已被广泛应用于食品、化工和医药行业。

天然椰子油在26℃以上是清澈透明的液体,当温度降到22℃以下时就变成白色的雪状固体,流动性差,在食品工业大量使用时,很难均匀分散于食品原料中,制约了其在工业中的应用^[6]。天然椰子油微胶囊的制备,解决了目前市场产品单一、口感不佳、低温凝固、使用及运输不便等制约产业发展的问题。目前,国内外对天然椰子油微胶囊的研究报道还比较少,且大都采用的是喷雾干燥的方式^[7-8]。本实验采用复合凝聚法制备天然椰子油微胶囊,通过冷冻干燥方式制备出性质较好的微胶囊产品,为天然椰子油微胶囊的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

天然椰子油,市售;明胶、阿拉伯胶、盐酸、氢氧化钠、石油醚(沸程60~90℃)、谷氨酰胺转氨酶(TG酶)(1.5 U/mg)等均为分析纯。

XHF-D高速分散器,GZX-9070MBE电热鼓风干燥箱,DP-406DG真空冷冻干燥机,YM-020S超声波清洗机,恒温恒湿培养箱,PHS-3C pH计,XDS-1A倒置生物显微镜,FA2004B电子天平,MS3000马尔文激光粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司),CM-700d分光测色计。

1.2 试验方法

1.2.1 天然椰子油微胶囊的制备

参考Zhang等^[9]的方法并稍作改动。分别取等量明胶和阿拉伯胶各加250 mL蒸馏水溶解,溶解后将二者混合均匀,缓慢加入一定量的天然椰子油,用高速分散器在10 000 r/min下乳化3 min,得到天然椰子油乳化液。将乳化液置于一定温度的水浴中,用电动搅拌器以400 r/min搅拌15 min,滴加质量分数10%的乙酸溶液,调整至适宜pH,10 min后将悬浮液用冰水浴冷却至10℃左右。滴加质量分数20%的NaOH溶液调整悬浮液pH至6.0。加入0.02 g TG酶,10℃固化处理6 h,静置、过滤、冷冻干燥,即得天然椰子油微胶囊产品。

1.2.2 包埋率及产率的计算

$$\text{包埋率} = \frac{\text{总含油量} - \text{表面油含量}}{\text{总含油量}} \times 100\%$$

$$\text{产率} = \frac{\text{微胶囊产品中芯材含量}}{\text{原料中芯材含量}} \times 100\%$$

表面油含量的测定^[9-11]:准确称取3 g样品,将样品放于滤纸上(滤纸已经叠放于漏斗上),用30 mL石油醚分数次洗涤样品,收集洗涤液,烘干至恒重。

总含油量的测定:用粉碎机将样品粉碎,准确称取5 g样品置于锥形瓶,加入50 mL石油醚,加塞摇匀,放于超声波清洗器50℃超声10 min,5 000 r/min离心10 min,收集上清液。重复上述操作两次,合并上清液,烘干至恒重。

1.2.3 微胶囊形态观察

取1滴固化后的复合凝聚天然椰子油微胶囊悬浮液,将其放在载玻片上用显微镜观察并拍照。

1.2.4 容重的测定^[12]

准确称量2 g(精确到0.001 g)左右的微胶囊产品,将其装入到20 mL的量筒中,然后在水平实验工作台上来回晃动50次左右使产品自然下沉,读取体积。最后用所称样品的质量除以其体积,即为样品的容重。

1.2.5 散落性^[13]

称取10 g左右的天然椰子油微胶囊产品,将其从漏斗自然下落到水平圆盘上,自然堆积成粉堆,通过测定粉堆的高度和半径,根据公式计算休止角。休止角反映散落性大小,休止角越大散落性越差,休止角越小散落性越好。

1.2.6 色泽

采用分光测色计,将仪器的测量口放在样品上进行测量。

1.2.7 粒径的测定

取适量天然椰子油微胶囊产品,加水分散至适宜浓度,然后用马尔文激光粒度分析仪测定其粒径。

1.2.8 数据统计与分析

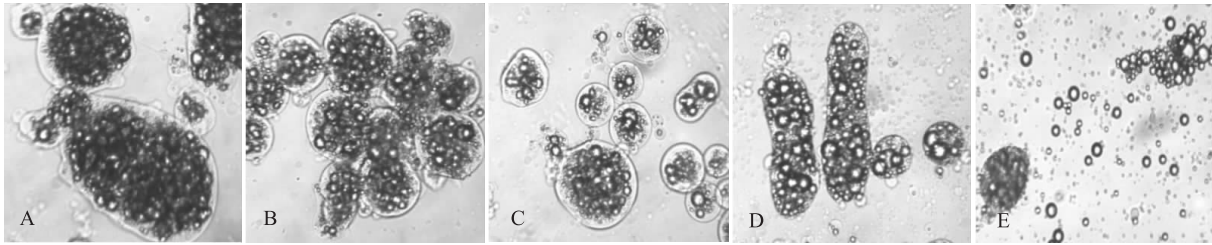
试验数据均为3次平行试验,测试结果以“均值±标准差”表示。采用SPSS 17.0软件进行统计分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 pH对天然椰子油微胶囊制备的影响

以壁材质量浓度20 g/L、芯壁比1:2、反应温度40℃为试验条件,研究pH对天然椰子油微胶囊制备的影响,结果见图1、图2。



注: A.pH 3.0; B.pH 3.5; C.pH 4.0; D.pH 4.5; E.pH 5.0。

图1 pH对天然椰子油微胶囊形态的影响(250×)

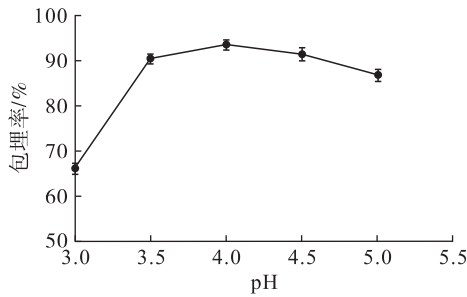


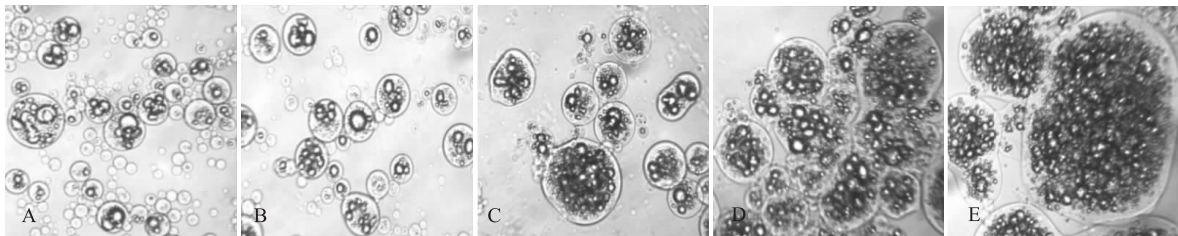
图2 pH对天然椰子油微胶囊包埋率的影响

由图1可以看出,pH对天然椰子油微胶囊形态有较大影响,当pH为4.0时显微镜观察结果显示微胶囊的大小比较均一,数量较多,多为规则的圆形;当pH为3.5和4.5时形成微胶囊的大小不均匀,形态不规则且出现粘连现象;当pH为3.0时粘连现象严重,开始发生凝聚现象;当pH为5.0时,微胶囊成形性较差。

由图2可以看出,当pH为4.0时,微胶囊的包埋率达到最大值,为 $(93.39 \pm 0.98)\%$,此时的产率也达到最大值,为 $(82.26 \pm 0.33)\%$ 。当pH大于或小于4.0时,包埋率均降低,可能是因为pH过低时溶液中所带的正电荷会抑制明胶电离,导致明胶带正电荷少,并且pH过低也使明胶的溶解性大大降低而发生凝聚。而当pH过高时,明胶所带的净电荷较少,难以与阿拉伯胶反应,微胶囊难以形成^[14]。因此,试验选用的pH为4.0。

2.1.2 壁材质量浓度对天然椰子油微胶囊制备的影响

以芯壁比1:2、反应pH 4.0、反应温度40℃为试验条件,研究壁材质量浓度对天然椰子油微胶囊制备的影响,结果见图3、图4。



注: A.5 g/L; B.10 g/L; C.20 g/L; D.30 g/L; E.40 g/L。

图3 壁材质量浓度对天然椰子油微胶囊形态的影响(250×)

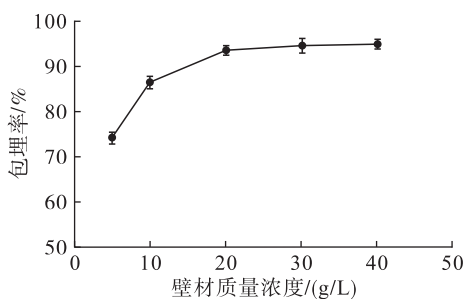


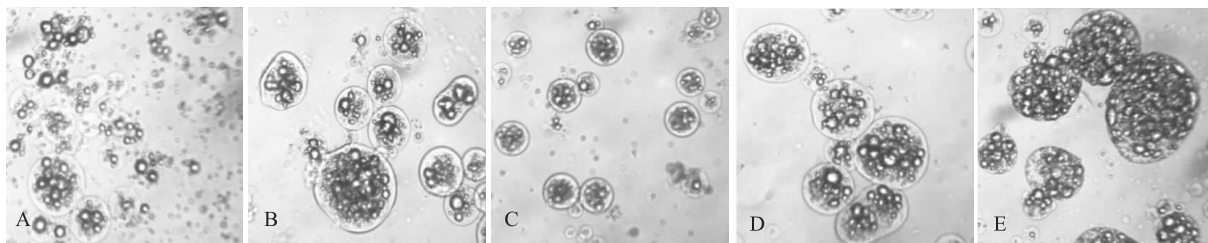
图4 壁材质量浓度对天然椰子油微胶囊包埋率的影响

由图3可以看出,随着壁材质量浓度的增加,微胶囊增大,形态由球形变得不规则。当壁材质量浓度为5 g/L时,复合凝聚微胶囊具有球形多核的结构;壁材质量浓度由5 g/L增加到20 g/L时,微胶囊仍保持球形多核的结构,粒径略有增加;壁材质量浓

度为30 g/L和40 g/L时,微胶囊球形度下降,体系中微胶囊间已经出现大规模的粘连。试验结果表明,壁材质量浓度增加时,由于芯壁比不变,乳状液滴的数量相应增大,悬浮液中单核微胶囊的浓度大幅增加,大量的单核微胶囊容易相互碰撞,聚集成粒径更大、数量更多的球形多核微胶囊;同时悬浮液体系中壁材质量浓度的增加,也提高了体系的黏度,进一步增加了大粒径球形多核微胶囊的碰撞机会,形成粒径很大、形态不规则的多核微胶囊。由图4也可以看出,随着壁材质量浓度的增加,微胶囊的包埋率相应增加,当壁材质量浓度为20 g/L时,微胶囊的包埋率为 $(93.39 \pm 0.98)\%$ 。随着壁材质量浓度继续增大,微胶囊包埋率增加不明显,且浓度过大会

造成壁材的浪费。因此,试验选用壁材质量浓度为20 g/L。

2.1.3 反应温度对天然椰子油微胶囊制备的影响



注: A.30 °C; B.40 °C; C.50 °C; D.60 °C; E.70 °C。

图5 反应温度对天然椰子油微胶囊形态的影响(250 ×)

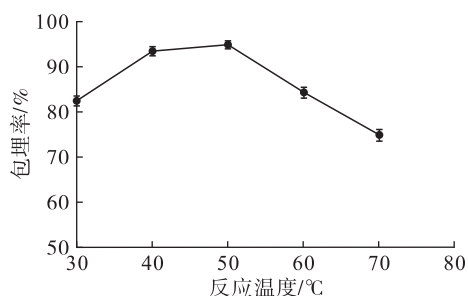


图6 反应温度对天然椰子油微胶囊包埋率的影响

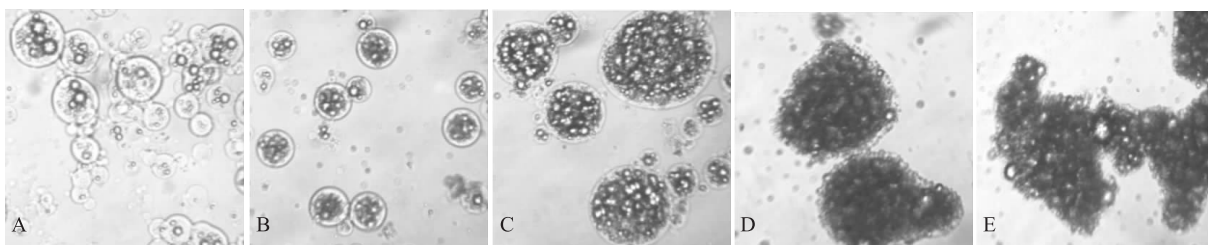
由图5、图6可以看出,当反应温度为40、50 °C和60 °C时,微胶囊成形性较好,形状多数规则,大小基本均一,且在50 °C时形态最佳,此时包埋率和产率均达到最大值,为(94.79 ± 0.88)%和(94.97 ± 0.76)%;当反应温度过高或过低时,微胶囊成形性变差,且包埋率也相应降低。这是因为温度过低时,明胶会发生凝胶现象,无法形成微胶囊;如果温度过高,不能形成坚固的囊壁。因此,试验选用最佳反应温度50 °C。

以壁材质量浓度20 g/L、反应pH 4.0、芯壁比1:2为试验条件,研究反应温度对天然椰子油微胶囊制备的影响,结果见图5、图6。

2.1.4 芯壁比对天然椰子油微胶囊制备的影响

以壁材质量浓度20 g/L、反应pH 4.0、反应温度50 °C为试验条件,研究不同芯壁比对微胶囊制备的影响,结果见图7、图8。

由图7、图8可以看出,芯壁比为1:3时微胶囊形态不规则且有空囊出现,此时的包埋率为(88.63 ± 1.25)%;当芯壁比为1:2时微胶囊的大小分布比较均一,数量较多,多为规则的圆形,此时包埋率为(91.03 ± 1.38)%;随着芯材含量的增加,微胶囊的粒径变大,当芯壁比为1:1时微胶囊比较饱满,此时微胶囊的包埋率达到最大值,为(93.71 ± 1.09)%,产率也达到了(80.55 ± 0.77)%;当芯壁比为2:1和3:1时,微胶囊粘连,形成的微胶囊的大小和形状不均匀,此时的包埋率分别为(90.25 ± 1.44)%和(77.67 ± 1.68)%,均低于芯壁比为1:1时的包埋率。因此,综合考虑选择芯壁比为1:1作为试验条件。



注: A.1:3; B.1:2; C.1:1; D.2:1; E.3:1。

图7 芯壁比对天然椰子油微胶囊形态的影响(250 ×)

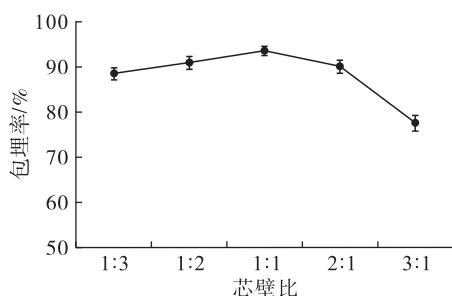


图8 芯壁比对天然椰子油微胶囊包埋率的影响

2.2 正交试验

以单因素试验为基础,采用四因素三水平正交试验设计,以天然椰子油微胶囊的包埋率为主要指标,以pH(A)、壁材质量浓度(B)、反应温度(C)、芯壁比(D)为试验因素,优化天然椰子油微胶囊的制备工艺参数。正交试验因素水平见表1,正交试验设计及结果见表2,方差分析见表3。

由表2可知,影响天然椰子油微胶囊包埋率的主

次因素为 $A > C > B > D$, 即 $\text{pH} > \text{反应温度} > \text{壁材质量浓度} > \text{芯壁比}$, 最佳工艺组合为 $A_1 B_2 C_1 D_3$ 。由表 3 可知, 芯壁比对包埋效果影响不显著, pH 、壁材质量浓度以及反应温度对包埋效果影响显著。复合凝聚法制备天然椰子油微胶囊的最佳工艺条件为: pH 3.5, 壁材质量浓度 20 g/L, 反应温度 40℃, 芯壁比 2:1。在最佳工艺条件下进行 3 次重复试验, 所得天然椰子油微胶囊的包埋率为 $(93.75 \pm 0.28)\%$ 。

表 1 正交试验因素水平

水平	A	B/(g/L)	C/℃	D
1	3.5	10	40	1:2
2	4.0	20	50	1:1
3	4.5	30	60	2:1

表 2 正交试验设计及结果

试验号	A	B	C	D	包埋率/%
1	1	1	1	1	92.65
2	1	2	2	2	93.57
3	1	3	3	3	91.31
4	2	1	2	3	89.49
5	2	2	3	1	89.64
6	2	3	1	2	90.50
7	3	1	3	2	66.65
8	3	2	1	3	75.29
9	3	3	2	1	71.43
k_1	92.51	82.93	86.15	84.57	
k_2	89.88	86.17	84.83	83.57	
k_3	71.12	84.41	82.53	85.36	
R	21.39	3.24	3.62	1.79	

表 3 方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	显著性
A	2 448.36	2	1 224.18	187.26	显著
B	47.16	2	23.58	3.61	显著
C	60.23	2	30.12	4.61	显著
D	14.41	2	7.21	1.10	不显著
误差	117.67	18	6.54		

注: $F_{0.05}(2, 18) = 3.55$ 。

2.3 天然椰子油微胶囊产品的基本性质(见表 4)

表 4 天然椰子油微胶囊产品基本指标

项目	指标	项目	指标
水分/%	2.88 ± 0.31	容重/(g/cm ³)	0.39 ± 0.11
表面油含量/%	4.20 ± 0.05	休止角/(°)	38.7 ± 0.97
总含油量/%	67.30 ± 0.08	色泽	$L^* 92.11 \pm 0.26$ $a^* -0.07 \pm 0.06$ $b^* 6.36 \pm 0.17$
包埋率/%	93.75 ± 0.28		
产率/%	90.05 ± 0.67		

制备的天然椰子油微胶囊产品呈乳白色, 粉末细致均匀。由表 4 可知, 以明胶、阿拉伯胶为壁材,

通过复合凝聚法制备的天然椰子油微胶囊产品水分含量很低, 为 $(2.88 \pm 0.31)\%$, 利于储藏; 且微胶囊具有较高的含油量和较高的包埋率; 通过粉末自由散落过程中, 粉末堆积形成的锥体高度和直径, 计算出休止角为 $(38.7 \pm 0.97)^\circ$, 表明粉末产品的黏性小, 流动性良好。

2.4 天然椰子油微胶囊产品粒径分布(见图 9)

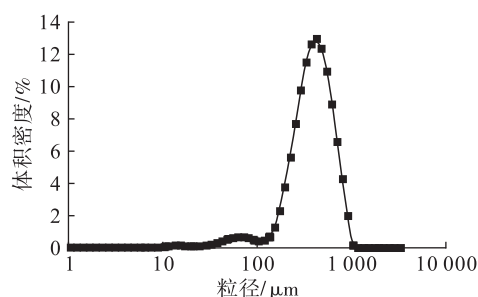


图 9 天然椰子油微胶囊产品的粒径分布

由图 9 可以看出, 天然椰子油微胶囊产品的粒径呈正态分布, 颗粒粒径分布越窄, 峰分布宽度也越小。天然椰子油微胶囊产品的粒径大小主要集中在 100 ~ 1 000 μm, 平均粒径为 413 μm, 其中粒径小于 193 μm 占 10%, 粒径小于 392 μm 占 50%, 粒径小于 676 μm 占 90%。微胶囊一致性较好, 大小比较均匀, 这与 Chew 等^[15]的研究结果相似。

3 结论

本试验用明胶、阿拉伯胶为壁材, 以 TG 酶作为固化剂, 通过复合凝聚法制备天然椰子油微胶囊, 得出天然椰子油微胶囊制备的最佳工艺条件为: pH 3.5, 壁材质量浓度 20 g/L, 芯壁比 2:1, 反应温度 40℃。在最佳工艺条件下, 制备的天然椰子油微胶囊产品包埋率为 $(93.75 \pm 0.28)\%$ 、产率 $(90.05 \pm 0.67)\%$ 、水分含量 $(2.88 \pm 0.31)\%$, 平均粒径 413 μm, 呈多核椭圆形, 且微胶囊产品的黏性小、流动性较好。

参考文献:

- [1] 赵松林. 椰子综合加工技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [2] 段岗君, 陈卫军, 宋菲, 等. 椰子油的精深加工与综合利用[J]. 热带农业科学, 2013, 33(5): 67-72.
- [3] 耿薇. 新鲜椰子果肉脂肪酸成分的 GC-MS 分析[J]. 广东化工, 2010, 37(1): 122-123.
- [4] ASSUNCAO M L, FERREIRA H S, DOS SANTOS A F, et al. Effects of dietary coconut oil on the biochemical and anthropometric profiles of women presenting abdominal obesity [J]. Lipids, 2009, 44(7): 593-601.
- [5] 刘小琴. 原生态椰子油熔融分提及物性研究[D]. 海口: 海南大学, 2012.

(下转第 120 页)

最适宜复合工艺组合为 $A_2B_2C_3$, 即硬脂酸添加量 4%、反应温度 80 °C、反应时间 50 min。最佳复合工艺条件下大米淀粉-硬脂酸复合物的复合指数最高, 为 21.06%。

3 结论

红外光谱分析显示, 大米淀粉-脂肪酸形成的是复合物而非混合物; 试验范围内复合指数随大米直链淀粉含量的升高而升高, 随脂肪酸不饱和度的升高而降低。大米淀粉-硬脂酸复合指数随硬脂酸添加量的增加、反应温度的升高、反应时间的延长呈先增大后趋于稳定趋势, 影响因素主次顺序为反应温度 > 硬脂酸添加量 > 反应时间; 制备大米淀粉-硬脂酸复合物最佳工艺条件为硬脂酸添加量 4%、反应温度 80 °C、反应时间 50 min, 此条件下复合指数最高, 为 21.06%。

参考文献:

- [1] LAN W, BIJUN X, JOHN S, et al. Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars [J]. *Food Hydrocoll*, 2010, 24(2): 208-216.
- [2] POLACZEK E, STARZYK F, MALENNKI K, et al. Inclusion complexes of starches with hydrocarbons [J]. *Carbohydr Polym*, 2000, 43: 291-297.
- [3] 刘延奇, 秦令祥, 吴史博, 等. 淀粉-脂质复合物的相互作用及研究进展 [J]. *食品科技*, 2009, 34(7): 211-212.
- [4] 覃小丽, 王永华, 钟金锋. 不同反应温度下 T1 脂肪酶催化油酸与甘油酯化反应动力学研究 [J]. *中国油脂*, 2017, 42(2): 34-37.
- [5] 蔡丽明, 高群玉. 淀粉-脂类复合物的研究现状及展望 [J]. *粮油加工*, 2007(2): 85-87.
- [6] 缪铭, 江波, 张涛. 淀粉-脂质复合物的研究进展 [J]. 现
- (上接第 98 页)
- [6] 高红日, 郑联合, 陈艳, 等. 饲用椰子油粉末制备工艺研究 [J]. *饲料广角*, 2011(11): 29-32, 45.
- [7] 张宇翔, 李雪, 张云竹, 等. 椰子油基结构油脂微胶囊制备及其性质研究 [J]. *食品科技*, 2017, 42(4): 167-171.
- [8] 黄玉林, 王慧, 陈卫军, 等. 天然椰子油微胶囊的质量评价 [J]. *中国油料作物学报*, 2013(10): 475-478.
- [9] ZHANG K, ZHANG H M, HU X C, et al. Synthesis and release studies of microalgal oil-containing microcapsules prepared by complex coacervation [J]. *Colloid Surface B: Biointerfaces*, 2012, 89: 61-66.
- [10] ZHOU D, PAN Y, YE J. Preparation of walnut oil microcapsules employing soybean protein isolat and maltodextrin with enhanced oxidation stability of walnut oil [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 83: 292-297.
- 代化工, 2007(6): 83-87.
- [7] GELDERS G G, GOESAERT H, DELCOUR J A. Amylose-lipid complexes as controlled lipid release agents during starch gelatinization and pasting [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54: 1493-1499.
- [8] MANGALA S L, UDAYASANKAR K, THARANATHAN R N. Resistant starch from processed cereals: the influence of amylopectin and non-carbohydrate constituents in its formation [J]. *Food Chem*, 1999, 64: 391-396.
- [9] JOHN K, SONG M, WILLIAM R, et al. Some factors determining the thermal properties of amylose inclusion complexes with fatty acids [J]. *Carbohydr Res*, 1995, 268(2): 233-247.
- [10] TANG M C, COPELAND L. Analysis of complexes between lipids and wheat starch [J]. *Carbohydr Polym*, 2007, 67: 80-85.
- [11] 王喜萍. 淀粉含量测定方法的研究初探 [J]. *粮油食品科技*, 2002, 9(2): 37-38.
- [12] 李玥. 大米淀粉的制备方法及物理化学特性研究 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2008: 22.
- [13] 邵俊. 聚乳酸/淀粉共混物的制备与表征 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 32-34.
- [14] MARY C T, LES C. Analysis of complexes between lipids and wheat starch [J]. *Carbohydr Polym*, 2007, 60(1): 80-85.
- [15] YUTA N, YA-JANES W. Effect of annealing on starch-palmitic acid interaction [J]. *Carbohydr Polym*, 2004, 57(3): 327-335.
- [16] 赵赛茹, 张丽霞, 黄纪念, 等. 高温焙炒对芝麻及芝麻油主要成分的影响 [J]. *中国油脂*, 2016, 41(2): 34-38.
- [11] 黄英雄, 孙红明, 华聘聘. 微胶囊化粉末油脂制品表面油测定方法的研究 [J]. *中国油脂*, 2002, 27(4): 61-63.
- [12] GOYAL A, SHARMA V, SIHAG M K, et al. Development and physico-chemical characterization of microencapsulated flaxseed oil powder: a functional ingredient for omega-3 fortification [J]. *Powder Technol*, 2015, 286: 527-537.
- [13] 张学鹏. 红花籽油微胶囊的制备、性质及其应用研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
- [14] 谢艳丽, 蒋敏, 陈鸿雁. 复凝聚法制备明胶/阿拉伯胶含油微胶囊工艺过程的研究 [J]. *化学世界*, 2010, 51(1): 33-37, 48.
- [15] CHEW S C, TAN C P, LONG K, et al. In-vitro evaluation of kenaf seed oil in chitosan coated-high methoxyl pectin-alginate microcapsules [J]. *Ind Crop Prod*, 2015, 76: 230-236.