

肉桂精油纳米乳液制备工艺研究

刘晓丽¹, 康亚男¹, 吴克刚^{1,2}, 魏浩^{1,3}, 廖经飞⁴, 沈雪荣⁵

(1. 广东工业大学轻工化工学院, 广东广州 510006) (2. 广东香飘三创(产学研)众创平台, 广东广州 510006)
(3. 广州市香思馨情健康科技有限公司, 广东广州 510006) (4. 广州芬豪香精有限公司, 广东广州 510000)
(5. 罗定市荣兴香料有限公司, 广东罗定 527200)

摘要: 研究了肉桂精油和中链脂肪甘油为油相、变性淀粉辛烯基琥珀酸淀粉酯等乳化剂制备纳米乳液的工艺条件。采用正交试验设计方法, 以乳液颗粒直径大小为指标优选高压均质法参数条件, Turbiscan 浓缩体系稳定性分析仪分析纳米乳液粒径大小及稳定性变化趋势。结果表明, 乳化剂质量百分比 20%, 油相质量百分比 10%, 肉桂精油和中链脂肪甘油质量比 1:3, 均质压力为 100 MPa, 循环均质 6 次的工艺条件下可得到粒径大小为 90~120 nm 的水包油相纳米乳液且颗粒大小一致, 储藏过程中不出现上浮和沉淀等不稳定现象。气相色谱-质谱分析鉴定了出肉桂精油总含量的 99.64%, 再应用峰面积归一法计算各组分的相对百分含量, 得出精油中主要的成分化合物有肉桂醛、肉桂酸、 α -蒎烯、邻甲氧基肉桂醛、 α -依兰烯和 α -毕橙茄醇等未发生明显变化。通过添加 83% (*m/m*) 中链脂肪甘油在油相中有助于延缓乳液中奥氏熟化现象, 在低温条件放置 15 d 肉桂精油保留率保持在 85%以上。

关键词: 肉桂精油; 高压均质; 乳液; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2017)8-161-167

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.024

Preparation Process of Cinnamon Oil Nanoemulsion

LIU Xiao-li¹, KANG Ya-nan¹, WU Ke-gang^{1,2}, WEI Hao^{1,3}, LIAO Jing-fei⁴, SHEN Xue-rong⁵

(1.College of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)
(2.Guangdong Xiangpiaosanchuang (Produce-Study-Research) Public Platform Guangzhou 510006, China)
(3.Guangzhou Xiangsixinqing Health Technology Co. Ltd, Guangzhou 510006, China) (4.Guangzhou Fenhao Flavour Co. Ltd, Guangzhou 510000, China) (5.Luoding Rongxin Flavour Co. Ltd, Luoding 527200, China)

Abstract: The conditions of the process used to prepare a nanoemulsion consisting of cinnamon essential oil and medium-chain triglycerides (MCTs) as the oil phase and modified starch (e.g., octenyl succinic acid modified starch) as the emulsifier were investigated. An orthogonal design method was adopted, where the parameters and conditions of high pressure homogenization were optimized according to emulsion particle size, and the Turbiscan dispersion stability analyzer was used to analyze the particle size and the stability of the nanoemulsion. Consequently, an oil-in-water nanoemulsion with a particle size of 90~120 nm was prepared with the following conditions: weight percentage of emulsifier, 20%; weight percentage of oil, 10%; mass ratio of cinnamon oil to MCT, 1:3; homogenization cycles, six; and homogenization pressure, 100 MPa. Moreover, the particle size was uniform, and no floatation and sedimentation occurred during storage of the nanoemulsion. Gas chromatography-mass spectrometry analysis identified 99.64% of the components from the cinnamon essential oil, and the relative contents (percentage) of all components were calculated using the peak area normalization method. The main compounds in the essential oil were cinnamaldehyde, cinnamic acid, α -pinene, 2-methoxycinnamaldehyde, α -ylangene, and α -cadinol, all of which did not change apparently throughout the process. The addition of 83% MCT to the oil phase helped to slow Ostwald ripening of the emulsion, and the retention rate of cinnamon essential oil was above 85% after 15 d of cold storage.

Key words: cinnamon essential oil; high pressure homogenization; nanoemulsion; stability

肉桂精油由桂皮等提取而得, 一般为黄色或琥珀

收稿日期: 2016-12-19

项目基金: 广东省科技计划项目(2016B010122054、2015B020204002、2014B020205005、2013B090600051)

作者简介: 刘晓丽(1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 食品化学

通讯作者: 吴克刚(1969-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 食品化学

色液体, 香气特异, 具有强烈的抗氧化和抑制菌落活性, 可以用作天然食品防腐保鲜剂^[1]。其主要抑菌成份是肉桂醛, 另还有肉桂酯、水杨醛、丁香酚和香兰素等, 随着时间的延长, 在应用过程其成分容易受到环境各方面影响, 使得挥发性物质含量减少, 其整体抑菌活性下降^[2,3]。另外, 肉桂精油存在水溶性低和对光、热和氧气敏感等特点, 也限制了在食品领域防腐

保鲜方面的应用^[4]。

纳米乳液是一种液相以液滴形式分散于第二相的胶体分散体系,属于非热力学稳定体系,粒度尺寸在50~200 nm^[5,6]。纳米乳液因其纳米级粒径可防止聚集和重力引起的乳液分离优势,具有抗沉降和乳析的动力学稳定特性,精油纳米级乳化体系可以提高精油的水溶性、稳定性和有效性^[7],植物精油纳米乳液作为广谱抑菌成分表现出更加优良的抑菌应用活性,在各种食品体系中具有很大的发展潜力^[8]。但植物精油所具有的部分水溶性,乳液常因奥氏熟化而失稳,因此精油纳米乳液制备在后期实际应用和长期保藏有一定的困难,限制了植物精油的抑菌性和保鲜抗腐性。目前有文献报道一些水不溶性的油相与植物精油混合制备纳米乳液后,产生可与因油滴聚集速率变化相抵消的混合熵从而达到抑制奥氏熟化现象^[9]。

本研究以辛烯基琥珀酸酯化淀粉(O SA 变性淀粉)为乳化剂,肉桂精油与中链脂肪甘油(MCT)作为混合油相,通过高压均质法制备理化性质稳定的肉桂油纳米乳液,并优化制备工艺条件,为植物精油纳米乳液包埋提供技术基础。

1 材料与方法

1.1 原料

1.1.1 原料与试剂

肉桂精油 3I-RG-03,均由香飘万里-三创联盟提供;中链脂肪甘油(MCT),上海阿拉丁科技股份有限公司购买;辛烯基琥珀酸淀粉钠(O SA 变性淀粉),CLEARGUM CO 01,由 ROQUETTE 公司购买。

1.1.2 主要仪器设备

DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱:上海申贤恒温设备厂;SHA-BA 恒温振荡器:常州澳华仪器有限公司;Turbiscan LAB Standard 稳定性分析仪:法国 Formulaction 公司;高压均质机 Emulsi Flex-03:加拿大 Avestin 公司;低速搅拌机 ZONCE:众时(上海)机械有限公司;高速离心机 SIGMR 1-13:天赐科仪公司;气相色谱质谱联用仪 GCMS-QP2010 Plus:日本岛津公司。

1.2 Turbiscan 分析仪测定原理

待测样品装在一个圆柱形的玻璃测试室中,采用两个同步脉冲近红外光源(波长 880 nm)探测器分别探测透过样品的透射光和被样品反射的反射光。探测头向样品高度(最高高度 55 mm)方向扫描,每 40 μm 高度采集一次透射光和反射光数据。透射光和反射光

以%表示,其含义是相对标准样品的光通量的百分比。扫描曲线给出了透射光和反射光随样品高度的变化关系。此仪器基于 Lambert-Beer 定律、米氏理论和 Stokes 公式衍生的沉淀定律,可以得到浓缩液体体系中颗粒的迁移速率 V 和平均粒径 $[d]$ 的关系,见式(1):

$$\lambda^*(d, \phi) = \frac{2d}{3\phi(l-g)Q_s} \quad (1)$$

式中, $g[d]$ 和 $Q_s[d]$ 是由米氏理论给出的光学参数。

因此,由仪器测量的反射光直接与颗粒体积浓度 l 和颗粒平均粒径 d 有关。

1.3 试验方法

1.3.1 肉桂纳米乳液的制备

根据梁蓉等文献报道^[10],先使用辛烯基琥珀酸淀粉钠乳化剂,参考其均质压力和均质次数选定为 600 bar, 10 次,设定油相(MCT:肉桂精油)不同比例分别为 0:1、1:5、1:3、1:1、3:1、5:1 和 1:0,则肉桂精油占油相质量百分比分别为 100%、83.3%、75%、50%、25%、16.7%和 0%,探讨油相比对乳液的影响。

确定好肉桂精油和 MCT 的比例,按照比例配制溶解形成油相,加去离子水溶解 O SA 变性淀粉制成不同百分变性淀粉溶液形成水相,在搅拌机 1~1.5 kr/min 转速的搅拌下缓慢将油相加入到水相剪切 10 min,制得粗乳液。进一步取定量粗乳液(10%, m/m)通过高压均质机进一步均质得到肉桂油纳米乳液。

1.3.2 纳米乳液制备工艺条件优化

在单因素试验的基础上,确定了油相(MCT:肉桂精油)配比,以均质压力、循环次数、淀粉百分比为考察因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验设计以乳液颗粒平均粒径大小为评价指标,优化制备工艺。因素水平表见表 1。

表 1 正交因素水平表

Table 1 Factors and levels of the orthogonal test

水平	A	B	C
	压力值/bar	循环次数/次	淀粉百分比/%
1	600	6	10
2	800	9	15
3	1000	12	20

1.3.3 肉桂纳米乳液平均粒径测定及其稳定性

检测肉桂纳米乳液置于稳定性分析仪检测箱中,温度控制在 30 ± 1 °C,在数小时内检测反射光或背射光随时间变化情况,分析肉桂精油纳米乳化液稳定情况。

1.3.4 乳液中肉桂精油乳化率的测定

采用水蒸气蒸馏法^[10], 取一定量制备得到的乳液放到 500 mL 圆底烧瓶中, 用少量水均匀分散后加入 120 mL 蒸馏水, 进行常压水蒸气蒸馏 1.5 h 左右, 获取乳白色液体, 直到滴出液体不再浑浊, 再冷冻高速离心 12 kr/min 获取下清液, 获取油相质量, 根据式(2)计算乳化产率。

$$\text{乳化产率}(\%) = \frac{m}{m_1 c} \quad (2)$$

式中, m 表示水蒸气蒸馏后称量的油相质量 (g); m_1 表示水蒸气蒸馏前取用的乳液质量 (g); c 表示均质前薄荷油所占体系质量分数 (%)。

1.3.5 乳液中肉桂精油化学成分的检测

根据 1.3.4 条件制备出的肉桂纳米乳液通过水蒸气蒸馏乳液, 得到一定量的肉桂精油, 采用 GC-MS 进行上样检测。气相色谱条件: DB-MS 毛细管色谱柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 载气为高纯氦气, 进样口

温度 250 °C, 进样量 1 μL, 流速 1 mL/min, 分流比 10:1, 起始柱温 60 °C, 保留时间 3 min, 程序升温速率 5 °C/min, 升到 300 °C 保持 3 min。质谱条件: 离子源温度 230 °C, 电离能量 70 eV, 质谱接口温度 300 °C, 扫描范围 20~500 m/z , 溶解延迟 2 min。

1.4 数据分析

实验平行进行三次, 并且数据以平均值(mean)±标准差(sd)表示, 方差分析 (ANOVA) 是用于两个及两个以上样本均数差别的显著性检验, $p \leq 0.05$ 时说明具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 油相对比对乳液制备的影响

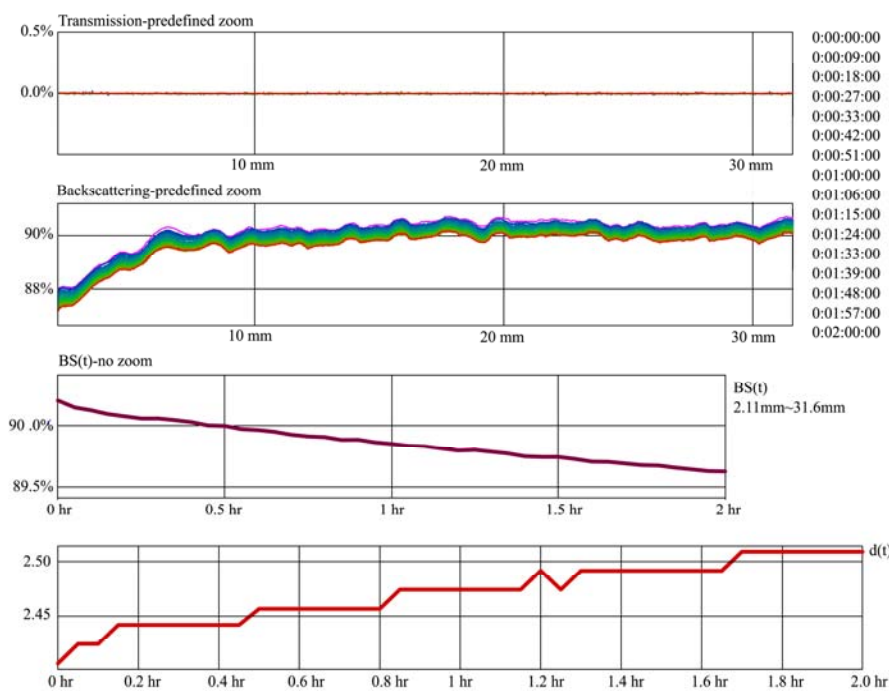


图 1 10%肉桂精油纳米乳液稳定性检测

Fig.1 Stability of 10% cinnamon essential oil nanoemulsion

在该实验第一步中肉桂精油占油相 100%条件下制备出, 由图 1 可以看出, 在 2 h 时间内, 乳液背射光通量随时间不断减小, 内部颗粒分布极不稳定, 且乳液颗粒平均大小迅速增大, 且短时间内立即达到微米级别甚至数小时后肉眼可见分层现象。由于乳液颗粒的运动速率受颗粒半径、乳液各项密度和黏度影响, 并存在微积分函数关系, 故更小粒径和较高的黏度保证乳液稳定性, 降低乳液颗粒上浮或者下沉几率, 同时粒径减少可影响到黏度的增加^[10]。因此可在实验中将乳液平均粒径作为乳液稳定性主要参考依据之一。

从图 2 可以看出随着肉桂精油在油相中所占比例增加, 乳液平均粒径不断增大, 当 MCT 在油相百分比达 50%时乳液粒径大小达到最大。特别注意的有: 肉桂精油比例在不断增加至 83.3%阶段, 乳液平均粒径和其比例增加缓缓变大, 而在其后肉桂精油比例增大, 纳米乳液的平均粒径突然快速增长达到微米级别。可见, 油相对比对乳液粒径影响大。多次重新制备样品测定发现, 当 MCT 在油相比例达到 10%甚至更低, 乳液平均粒径波动幅度大, 重复性低, 可以推断 MCT 的添加大大改善乳化体系的不稳定性,

减少精油分布颗粒的急剧增加的可能。随着 MCT 在油相比比例增加,乳液粒径保持在 100 nm 至 140 nm 之间,粒径大小较为稳定。根据 Kelvin 公式^[11],组成粒子的物质,其溶解度会随着粒子减少而增大,一旦当大、小粒子同时存在时,小粒子油相容易通过介质流动扩散到大粒子,于是大粒子逐渐增大而小粒子越来越甚至消失,最后乳液颗粒粒径增大发生奥氏熟化现象^[12],降低了乳化液的稳定性。Yu 等人研究表明^[13],MCT 可以减缓乳化液因奥氏熟化带来的颗粒凝聚,出现浮油的现象。本实验也证实 MCT 的加入改变了油相配比有助于纳米乳液的颗粒形成,缓解由于肉桂精油的溶解性引起纳米乳化液的奥氏熟化现象。

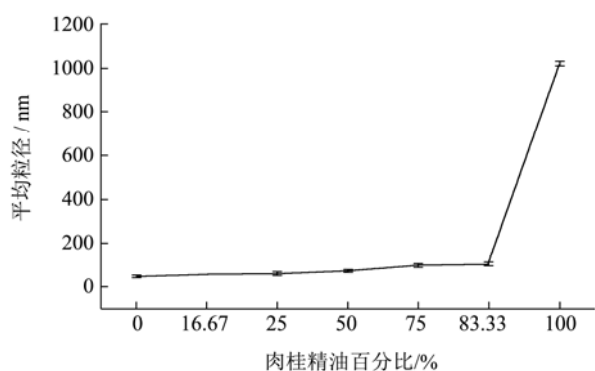


图2 肉桂精油百分比对粒径大小的影响

Fig.2 Effects of the cinnamon essential oil percentage on the nanoemulsion particle size

2.2 均质条件对肉桂精油纳米乳液粒径大小影响

影响

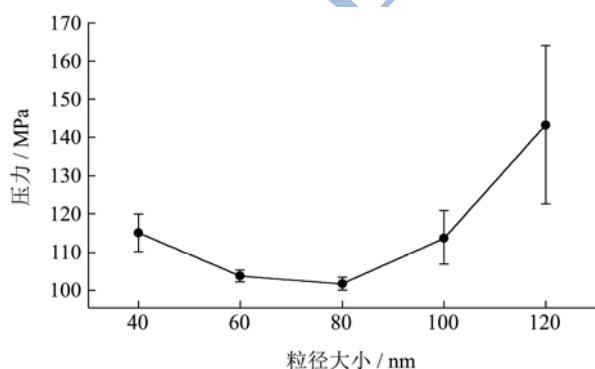


图3 压力值对粒径大小的影响

Fig.3 Effects of homogenization pressure on the nanoemulsion particle size

常温条件下,以 OSA 变性淀粉为乳化剂,使用 MCT 作为助乳化剂,根据 2.1 取油相(MCT:肉桂精油)比例为 3:1,淀粉百分比占 20%,探究均质压力和循环次数对乳液粒径大小的影响。如图 3 和图 4 所示,均质压力分别为 30、40、60、80、100、120 MPa,

均质次数为 3、6、9、12 和 15。由图 3 可知,乳液粒径随着压力值的增大而显著减小,直到压力达到 80 MPa 时,粒径达到最小 102 nm。随着压力值增大乳液颗粒大小也随之增大。但乳液平均粒径保持在 100 nm 至 120 nm 之间。在图 4 可知,乳液粒径随着均质次数增加而急剧减小,循环 9 次之后,乳液粒径大小趋于稳定。而同样均质次数下,均质压力增大颗粒大小会明显减小,且压力不断增大达到一定范围后,粒径大小不再受到影响。这与 Rong Liang 等人^[14]的结论基本一致。

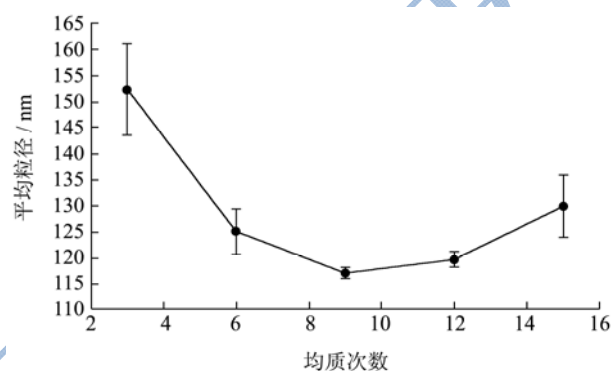


图4 均质次数对粒径大小的影响

Fig.4 Effect of the number of homogenization operation cycles on the nanoemulsion particle size

2.3 变性淀粉含量百分比对乳液粒径影响

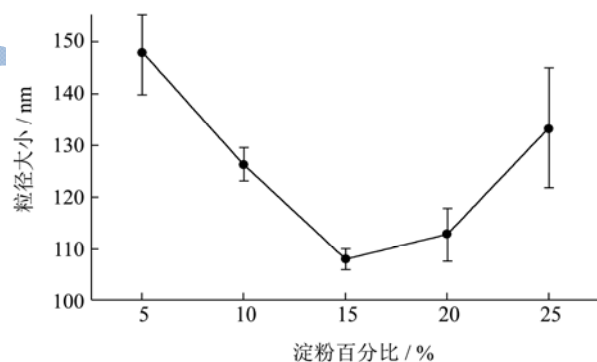


图5 淀粉百分比对平均粒径的影响

Fig.5 Effect of the starch amount on the nanoemulsion particle size

纳米乳液制备过程中,配方中变性淀粉质量含量会影响乳液体系的运载效率、储藏性,及后期加工的实际应用的可操作性。如果含量过高,颗粒之间可能会产生集聚从而会增大乳液粒径和降低其稳定性,产生不利影响^[10]。以 OSA 变性淀粉为乳化剂,油相(MCT:肉桂精油)比例为 3:1,均质压力为 80 MPa、均质循环次数为 9 次的条件下,变性淀粉含量对乳液粒径影响见图 5。淀粉含量占乳液的百分数分别是 5%、10%、15%、20%和 25%,随着淀粉含量增加乳液粒径显著

降低, 当淀粉百分比超过 15% 之后, 粒径随着淀粉含量增加而增大, 但增幅不超过 25 nm。

2.4 肉桂精油纳米乳液工艺正交实验设计

在单因素试验基础上, 根据正交实验设计原理, 选取均质压力、均质循环次数、淀粉百分比三个因素对乳液制备工艺条件进一步优化。正交试验结果见表 2。根据极差值大小, 影响乳液粒径大小因素为 B>A>C, 不考虑到三者单因素交互作用的情况, 可以看出 A 和 B 为主要影响因素, C 为次要因素。根据表 3 方差分析, C 组均方小于误差均方, 将 C 归入新的误差。查的临界值 $F_{0.05}[2, 4]=6.94$, 明显 A 和 B 对实验指标有显著影响。根据实验指标越小越好, 即最优工艺参数条件为 $A_3B_1C_3$ 。

表 2 正交实验数据

Ne	A	B	C	D	乳液平均粒径/nm
1	1	1	1	1	123±2.51
2	1	2	2	2	121.8±3.01
3	1	3	3	3	128.5±3.21
4	2	1	2	3	116.3±1.53
5	2	2	3	1	115.5±2.65
6	2	3	1	2	121±2.08
7	3	1	3	2	112±3.56
8	3	2	1	3	118.7±2.01
9	3	3	2	1	124±3.22
K1	124.43	117.1	120.9	120.83	
K2	117.6	118.67	120.7	118.27	
K3	118.23	124.5	118.67	121.17	
R	6.83	7.4	2.23	2.9	

表 3 工艺参数方差分析

方差来源	SS	f	MS	F	显著性
压力 A	85.54	2	7.05	6.94	*
次数 B	91.24	2	7.53	6.94	*
误差 C+D	24.27	4	1.25	6.94	

2.5 肉桂油纳米乳液稳定性分析

采用优化后的工艺参数制备肉桂精油纳米乳液, 取 20 mL 纳米乳液置于稳定性分析仪中常温条件下放置 8 h, 静止观察。8 h 内透射光即透光率为零, 背射光随时间呈稳定持平状态且背射光不断增大, 初步判断乳液粒径小于 600 nm。如图 6 所示, 根据稳定性分析仪实验原理计算出 8 h 内, 平均粒径大小在 70 nm 左右且 8 h 内变化范围小, 属于稳定状态。根据图 7

可以看出, 2 h 内含 MCT 的肉桂乳化液背射光通量呈现变大趋势, 没有添加 MCT 的肉桂乳化液背射光通量在不断减少, 但前者 $\Delta BS(t)$ 值明显小于后者。这表明 MCT 的加入明显增强纳米乳液的稳定, 及有效减少纳米乳液颗粒大小。

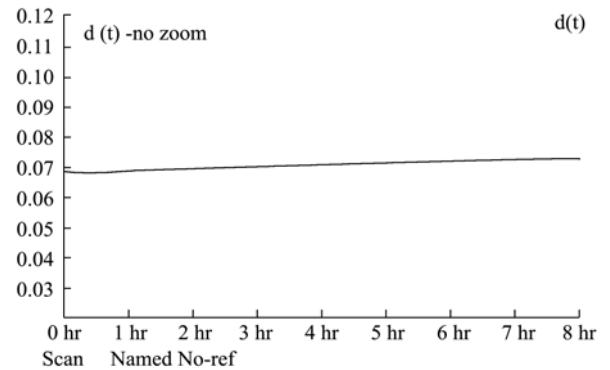


图 6 肉桂精油纳米乳液粒径变化

Fig.6 Change in the particle size of the cinnamon essential oil nanoemulsion

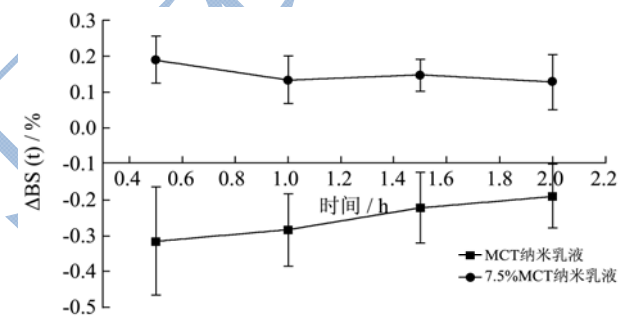


图 7 不同 MCT 含量肉桂精油纳米乳液稳定性比较

Fig.7 Comparison of the stabilities of cinnamon essential oil nanoemulsions with different MCT contents

2.6 乳液储藏过程中粒径变化

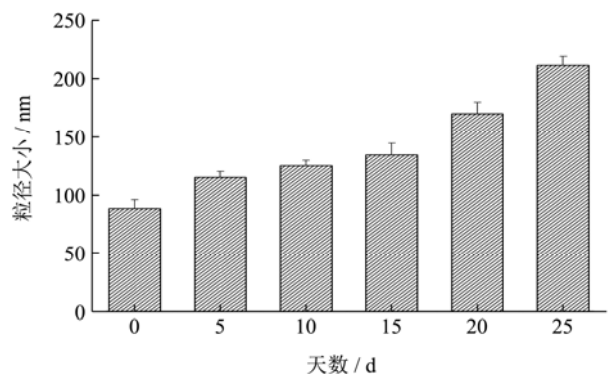


图 8 纳米乳液粒径大小随储藏时间变化的情况

Fig.8 Change in the nanoemulsion particle size with storage time

根据最佳工艺参数条件下制备得到肉桂精油纳米乳液在低温储藏过程粒径变化趋势如图 8 所示。从数

据可以看出,从储藏开始的乳液 1 d~15 d,乳液粒径大小变化范围不大,保持在 150 nm 之内。从 20 d 后出现较明显的粒径增大趋势达到 200 nm,但依然保持在纳米级别大小,表现出明显的稳定性。

2.7 乳液储藏过程中乳化率变化

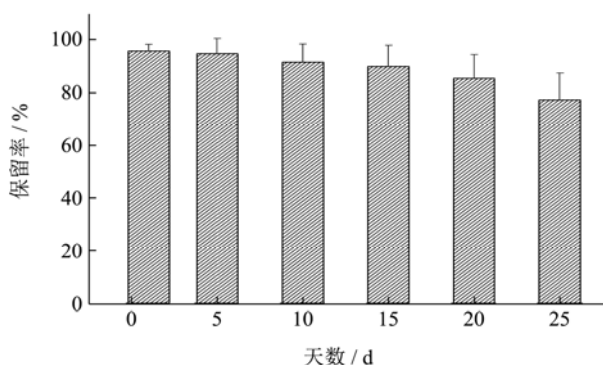


图9 肉桂精油保留率随时间变化情况

Fig.9 Change in the retention rate of cinnamon essential oil with storage time

乳液在储藏过程中,乳化率随时间增长的变化情况,反应被包埋物植物精油的损失。这不仅和乳液稳定性有关,还和乳化剂、助乳化剂特性相关,其可能是变性淀粉在油水相交表层形成的粘弹性高的界面膜相关。图9反应 25 h 里肉桂精油乳化率的变化情况,最开始第 1 d 乳化率达 95.59%而后 10 h 保留率保持在

91%以上,基本保持不变。15 h 后保留率下降直到 25 h 降到 75.14%。但整体仍显示出较好的储藏稳定性。此结果^[14]和朱卫红等人结论相符:变性淀粉作为乳化剂具有较高的储藏稳定性。

2.8 乳液中肉桂精油化学成分的检测

用气相色谱-质谱连用仪对肉桂精油的化学成分进行分离鉴定分析,得到的总离子流图共显示 31 个峰,利用标准质谱库检索,结合查阅质谱手册并与文献核对,分别对主要色谱峰加以确认,共鉴定出 30 种化合物,其含量占该精油相对含量的,分析鉴定结果见表 4。

从表 4 可以看出,从乳液中含有的肉桂精油能分离鉴定出 30 种挥发性化合物,占总含量的 99.64%,包括烯、酯、醇、醛和酮等化合物。其中相对含量较高的化合物有肉桂醛(79.08%)、2'-甲氧基肉桂醛(9.17%)、苯甲醛(1.64%)和 2-甲氧基苯甲醛(1.4%)。根据邱松山,陈芳玲等^[15]肉桂精油主要成分为反式-肉桂醛、顺式-肉桂醛、肉桂酸、 α -蒎烯、邻甲氧基肉桂醛、 α -依兰烯和 α -毕橙茄醇等未发生明显变化,则说明在上述条件优化过程中制备肉桂纳米乳液时,能有效将精油成分稳定在乳液颗粒中,高压均质过程不对其主要成分造成明显损失。

表 4 肉桂精油化学成分分析

Table 4 Analysis of the chemical components of cinnamon essential oil

序号	保留时间/min	化合物	相对含量/%
1	11.495	苯丙醛	1.64
2	13.074	反式肉桂醛	0.87
3	13.797	2-甲氧基苯甲醛	1.4
4	15.188	顺式肉桂醛	79.08
5	16.309	1,3-二甲基-8-(1-甲基乙基)三环(+)-环苜蓿烯	0.06
6	16.612	α -蒎烯	0.51
7	17.241	β -榄香烯	0.04
8	17.558	4-丁基苯甲醇	0.92
9	17.939	1-石竹烯	0.22
10	18.301	柠檬烯	0.11
11	18.441	(+)-香橙	0.07
12	19.026	香树烯	0.26
13	19.211	乙酸桂酯	0.45
14	19.394	1-异丙基-7-甲胺-4-亚甲基-1,2,3,4,4a,5,6,8a-八氢化萘	0.6
15	19.591	α -姜黄烯	0.42
16	19.745	邻甲氧基肉桂醛	0.24
17	19.893	(+)-喇叭烯	0.21

转下页

接上页

18	19.984	α -依兰油烯	0.42
19	20.118	1-甲基-4-环己烯	0.48
20	20.323	γ -杜松烯	0.24
21	20.527	δ -荜澄茄烯	0.41
22	20.653	去氢白菖烯	0.17
23	20.765	α -香柑油烯	0.15
24	20.979	丁香烯	0.19
25	21.38	4-甲氧基肉桂醛	9.17
26	21.634	反式-橙花叔醇	0.13
27	22.169	桉油烯醇	0.52
28	22.499	肉豆蔻醛	0.24
29	45.194	三辛酸甘油酯	0.23
30	49.506	三癸酸甘油酯	0.15

3 结论

采用高压均质法,以 OSA 变性淀粉为乳化剂, MCT 为助乳化剂等原料制备肉桂精油纳米乳液,在 OSA 变性淀粉质量百分比占 20%, MCT:肉桂精油=3:1,均质压力达 100 MPa,均质循环次数 6 次,可得到平均粒径较小、稳定性好的肉桂精油纳米乳液,低温条件可保存 25 d 以上无浮油,聚沉现象。MCT 的加入有利于油相被包埋的稳定性,形成更稳定界面膜,缓解了奥氏熟化给纳米乳液带来小颗粒集聚成大颗粒甚至消失现象。

参考文献

- [1] 高翔.丁香抑菌作用及其在食品保鲜中的应用[J].中国调味品,2007,12:21-23
GAO Xiang. The bacteriostatic mechanism of *Syzygium aromaticum* (L.) and its applications in food fresh keeping [J]. China Condiment, 2007, 12: 21-23
- [2] 杨虎,高国强.超临界 CO₂ 萃取及气质联用分析沙枣花精油成分[J].食品科学,2013,34(14):152-156
YANG Hu, GAO Guo-qiang. Gas chromatographic-mass spectrometric analysis of essential oil extracted by supercritical CO₂ from flowers of *Elaeagnus angustifolia* L. [J]. Food Science, 2013, 34(14): 152-156
- [3] 刘占东,李璐,全国芬,等.肉桂精油壳聚糖纳米粒的制备及在冷却肉保藏中的应用研究[J].西北农林科技大学学报,2016,5(44):193-199
LIU Zhan-dong, LI Lu, QUAN Guo-fen, et al. Preparation of cinnamon essential oil chitosan nanoparticles and study on quality of chilled pork [J]. Northwest Sci-Tech. Agriculture and Forestry, 2016, 5(44): 193-199
- [4] 赵瑞鹏,王一非.肉桂精油微胶囊的制备及其抑菌效果研究[D].上海:上海应用技术学院,2015
ZHAO Rui-peng, WANG Yi-fei. Preparation and antibacterial properties of cinnamon essential oil microcapsules [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015
- [5] 李倩,刘晨光.纳米技术在食品科学中的应用研究进展[J].中国农业科技导报,2009,11(6):24-29
LI Qian, LIU Chen-guang. Research progress on application of nanotechnology in food science [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2009, 11(6): 24-29
- [6] 康波,齐军茹,杨晓泉,等.纳米乳液的制备及稳定性研究进展[J].中国食品添加剂,2008,4(3):102-104
KANG Bo, QI Jun-ru, YANG Xiao-quan, et al. The research development of formation and stability of nanoemulsions [J]. China Food Additives, 2008, 4(3): 102-104
- [7] 侯振建,付子林,陈俊生,等.蜂胶纳米化技术研究[J].食品科学,2008,29(5):199-200
HOU Zhen-jian, FU Zi-lin, CHEN Jun-sheng, et al. Study on propolis microemulsion [J]. Food Science, 2008, 29(5): 199-200
- [8] Donsi F, Annunziata M, Sessa M, et al. Nanoencapsulation of essential oils to enhance their antimicrobial activity in foods [J]. Food Science and Technology, 2011, 44(9): 1908-1914
- [9] Baranauskienė R, Bylaite E, Zukauskaitė J, et al. Flavor retention of peppermint (*Mentha piperita* L.) essential oil spray-dried in modified starches during encapsulation and storage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(8): 3027-3036
- [10] 梁蓉,麻建国.以 OSA 变性淀粉为乳化剂的纳米乳液制备及特性研究[D].无锡:江南大学,2013

- LIANG Rong, MA Jian-guo. Research on the preparation and characteristics of nanoemulsions using OSA modified starch as emulsifier [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013
- [11] Tim J Wooster, Matt Golding, Peerasak Sanguansri. Impact of oil type on nanoemulsion formation and Ostwald ripening stability [J]. *Langmuir*, 2008, 24(22): 12758-12765
- [12] 沈钟,王果庭.胶体与表面化学(第3版)[M].北京:化学工业出版社,2011
- SHEN Zhong, WANG Guo-ting. Colloid and surface chemistry (the third edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011
- [13] Yu H L, Shi K, Liu D, et al. Development of a food-grade organogel with high bioaccessibility and loading of curcuminoids [J]. *Food Chemistry*, 2012, 131: 48-54
- [14] Rong Liang, Shi-qi Xu, Charles F Shoemaker, et al. Physical and antimicrobial properties of peppermint oil nanoemulsions [J]. *Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(30): 7548-7555
- [15] 邱松山,陈芳玲,姜翠翠,等.肉桂皮精油提取工艺的优化及成分分析[J].*中国调味品*,2015,8:111-115,122
- QIU Song-shan, CHEN Fang-ling, JIANG Cui-cui, et al. Optimization of extraction technology and component analysis of cinnamon peel volatile oil [J]. *China Condiment*, 2015, 8: 111-115, 122