

以米糠蛋白为乳化剂的 β -胡萝卜素 纳米乳液超声乳化制备工艺优化

魏春红*

黑龙江八一农垦大学食品学院, 大庆 163000

摘要:为提高米糠蛋白的利用价值及应用意义,本研究拟采用超声乳化法制备以米糠蛋白为乳化剂的 β -胡萝卜素纳米乳液,本研究采用响应面优化法获取了米糠蛋白纳米乳液超声乳化制备工艺:超声温度 50 °C,超声功率 490 W,超声时间 280 s 和米糠蛋白浓度 4.5%,在此条件下米糠蛋白纳米乳液的平均粒径为 190 nm,乳化产率为 88.1%,兼具较强的稳定性。研究结果将为新型功能性食品、纳米食品的开发提供技术途径及研发思路。

关键词: 超声乳化;米糠蛋白; β -胡萝卜素;纳米乳液

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2017.6.024

Optimization of Ultrasonic Process to Prepare β -Carotene Nanoemulsions Emulsified by Rice Bran Protein

WEI Chun-hong*

Heilongjiang Bayi Agricultural University, College of Food Science, Daqing, 163000, China

Abstract: To enhance the application value and significance of rice bran protein, ultrasonic process was used to prepare β -carotene nanoemulsions emulsified by rice bran protein. The optimal ultrasonic emulsion preparation process was determined as follows: ultrasonic temperature of 50 °C, ultrasonic power of 490 W, ultrasonic time of 280 s and rice bran protein concentration of 4.5%. The average particle size of rice bran protein nanoemulsions was 190 nm and the emulsification yield of that was 88.1% under these conditions, it also had a strong stability. The results provided the technical means and ideas for developing new functional food and nano food.

Key words: ultrasonic emulsion; rice bran protein; β -carotene; nanoemulsion

目前,针对食品中功能性营养成分构建的纳米运输载体,如纳米脂质体、固体脂质纳米粒、聚合物纳米囊、纳米球、纳米分散液、微乳液、纳米乳液等,一直是食品纳米技术研究的重点和热点^[1-6]。纳米载体技术是微胶囊技术向纵深的发展,纳米级的粒径赋予其特殊的小尺寸效应和表面效应。因此,除了能很好的实现对营养素的保护以外,纳米载体往往显示出更高的稳定性和更卓越的体内吸收、控释和靶向性功能^[7-9]。

小分子表面活性剂如吐温(Tween)、司盘(Span)等,具有极易在油水界面展开,降低表面张力能力等特性,在纳米食品中得到广泛应用。但这种化学合成表面活性剂的使用及其吸收模式,引起

了研究人员对其安全性的担忧。为避免小分子表面活性剂的安全性隐患,研究人员开始探索在纳米乳液的制备中使用天然生物大分子乳化剂,如 β -乳球蛋白、乳清蛋白、变性淀粉等^[10-13]。Qian^[11]、Charoen等^[12]研究发现蛋白质和变性淀粉等大分子乳化剂稳定的乳液均表现出良好的抗油脂氧化特性。由于大分子吸附存在扩散、吸附和构象重排三个步骤,低的吸附速率导致在使用超高压均质时无法瞬间饱和和吸附和稳定纳米级液滴,粒径多处于 150 nm 左右。同时,在界面上空间结构复杂的生物大分子可形成包含卧式、环式、尾式粘弹性吸附膜,与形成紧密排列单分子层吸附的小分子乳化剂相比,不仅加强了乳液颗粒之间的空间排斥力,而且能有效的阻隔体系与外界环境的接触。因此,生物大分子对乳液物理稳定性和对功能性营养成分保护作用优于小分子乳化剂。鉴于此,本研究拟选择生物大分子米糠蛋白作为乳化剂用于制备纳米乳液,为提高米糠

收稿日期: 2016-08-26 接受日期: 2016-12-07

基金项目: 黑龙江省农垦总局“十三五”重点科技计划(HNK135-05-01)

* 通信作者 E-mail: ndweichunhong@163.com

蛋白的利用价值及应用意义提供理论参考。

超声波法是利用高强度的超声波来制备含有微细液滴乳液的方法^[14],其原理主要是通过超声波的探头释放高强度的破坏力来制备纳米乳液,目前台式超声波仪器已经广泛地应用于实验室生产小批量的纳米乳液,用于大规模生产的超声波均质机也已被应用于工业生产,超声乳化法具有乳液粒径小、分布窄、乳液稳定、表面活性剂的需量小、生产成本低,易操作、污染小、高效节能等优势^[14]。鉴于此,本研究拟采用超声乳化法制备米糠蛋白纳米乳液,以期作为新型功能性食品、纳米食品的开发提供技术途径及研发思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

米糠,黑龙江东方粮油集团; β -胡萝卜素、色谱纯甲醇、色谱纯乙腈,美国 Sigma 公司;实验所需基础试剂均为分析纯,北京化学试剂公司。

1.2 实验仪器

Ultra-Turrax T25 高速分散器,德国 IKA 公司;Zetasizer Nano-ZS 90 光散射粒径分析仪,英国 Malvern 公司;S22-2 型恒温磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;AL204 型分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Scientz-IID 型超声波细胞破碎仪,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.3 米糠蛋白提取

精确称取脱脂米糠 30 g,按料液比 1:10 加入 300 mL 水,用 NaOH 溶液调 pH 至 9,45 °C 下恒温水浴搅拌 2 h,4000 rpm 下离心 20 min,收集上清液(采用福林酚法测蛋白浓度),调节 pH 至 4.5,4000 rpm 离心 15 min,倾去上清液,沉淀于 4 °C 对蒸馏水透析 48 h,沉淀真空冷冻干燥,干粉于 -20 °C 保存备用,冻干所得的米糠蛋白纯度为 90.21%。

1.4 乳状液平均粒径分析及 PDI

用 Zetasizer Nano-ZS 90 光散射粒度分析仪测定 β -胡萝卜素乳状液平均粒径、粒径分布及多分散系数(PDI)情况, β -胡萝卜素油滴的折射率设置为 1.45,水相溶液折射率设置为 1.33。为了降低多重光散射效应,分析前用 pH 7.0 的超纯水稀释 β -胡萝卜素乳状液 50 倍。

1.5 米糠蛋白纳米乳液超声乳化工艺

首先,将以一定质量浓度米糠蛋白溶解于超纯水中作为水相,另取一定量的 β -胡萝卜素浓度为 0.

1% (w/w) 溶于玉米油中,并采用磁力搅拌器充分搅拌,直至 β -胡萝卜素完全溶解。将油相与蛋白质水相溶液按照 1:9 的重量比混合均匀,用高速分散器在 22000 rpm 下分散 2 min,获得粗乳液。取适量粗乳液置于烧杯中,在超声波细胞破碎仪内进行纳米乳液制备,工作时间和间歇时间分别为 3 s 和 2 s,以循环冷热水控制超声温度。

1.6 纳米乳液 β -胡萝卜素乳化产率

以乙醇/正己烷的混合有机相萃取纳米乳液中的 β -胡萝卜素,用 HPLC 分析 β -胡萝卜素的含量。分离条件选择室温,色谱柱选择适用于胡萝卜素类物质分离的 C₃₀ 色谱柱(250 × 4.6 mm, 5 μ m),流动相为甲醇(A)和甲基叔丁基醚(B),流速为 1.0 mL/min,等梯度洗脱,样品进样量为 20 μ L,并以 DAD 检测器对 450 nm 处进行检测。实验数据采用 Dionex Chromeleon 色谱管理与量化系统软件进行分析,通过比对峰面积与标准曲线,确定纳米乳液中 β -胡萝卜素的浓度。通过上述方法确定纳米乳液中 β -胡萝卜素的浓度,并按照下述公式计算乳化产率:

$$\text{乳化产率}(\%) = \frac{\text{纳米乳液中 } \beta\text{-胡萝卜素含量}}{\text{总 } \beta\text{-胡萝卜素含量}} \times 100$$

1.7 米糠蛋白纳米乳液超声乳化制备工艺优化

以 β -胡萝卜素纳米乳液平均粒径及乳化产率为考察指标,通过单因素实验考察超声温度、超声功率、超声时间、米糠蛋白浓度对两指标的影响规律。在单因素实验基础上,进一步对试验进行响应面分析设计,利用 Design-Expert 软件优化试验结果,选取超声温度 A(°C)、超声功率 B(W)、超声时间 C(s) 及米糠蛋白浓度(%) 4 个因素为自变量,以纳米乳液平均粒径 R₁(nm) 及乳化产率 R₂(%) 为响应值,设置 3 因素 5 水平进行试验,如表 1 所示。

1.8 数据处理

每组试验都进行三次平行试验,并将试验数据进行误差分析。采用统计学软件 SPSS 18 对试验数据进行方差分析、相关性和差异显著性分析;采用 Origin8.5 软件进行作图;采用 Design-Expert 软件进行响应面数据分析及方差分析。

2 结果与分析

2.1 超声温度的单因素确定实验

本研究通过控制超声功率 360W、超声时间 240 s、米糠蛋白浓度 3%,考察不同超声温度(20、30、40、50、60、70、80 °C)对纳米乳液平均粒径及乳化产率的影响规律,结果如图 1 所示。

表 1 因素编码表

Table 1 Factors coding table

因素水平 Factor levels	超声温度 A Ultrasonic temperature A (°C)	超声功率 B Ultrasonic power B (W)	超声时间 C Ultrasonic time C (s)	米糠蛋白浓度 Rice bran concentration (%)
-2	40	420	240	3.00
-1	45	450	270	3.50
0	50	480	300	4.00
1	55	510	330	4.50
2	60	540	360	5.00

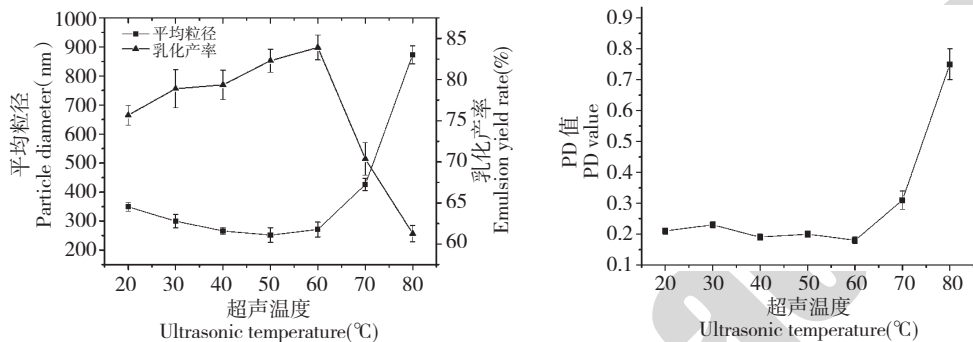


图 1 超声功率对纳米乳液平均粒径、乳化产率及 PDI 的影响

Fig. 1 Effect of ultrasonic temperature on the average particle size, emulsion yield and PDI of nanoemulsion

由图 1 可知,随着超声温度的增加,纳米乳液的平均粒径呈现先降低后增加的变化趋势,而乳化产率呈现先增加后降低的变化趋势。在超声温度为 50 °C 时,尽管平均粒径最低,而此条件下纳米乳液的乳化产率相对较高,为了节约能源降低能耗,在后续研究中选择超声温度为 50 °C 为最优值。此外,随着超声温度从 20 °C 增加至 60 °C,纳米乳液的 PDI 指数并未发生显著变化,表明超声温度自 20 °C 增加至 60 °C 并未显著影响纳米乳液分散均一性。而随

着超声温度的进一步增加,纳米乳液的 PDI 值呈显著增大的变化趋势,此处理条件制备纳米乳液的粒径分布范围更大,纳米乳液稳定性降低。

2.2 超声功率的单因素确定实验

本研究通过控制超声温度 40 °C、超声时间 240 s、米糠蛋白浓度 3%,考察不同超声功率(120、240、360、480、600 W)对纳米乳液平均粒径、乳化产率及 PDI 的影响规律,结果如图 2 所示。

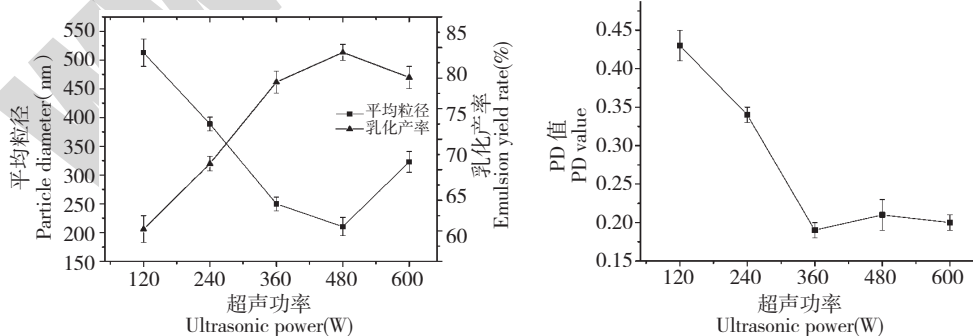


图 2 超声功率对纳米乳液平均粒径、乳化产率及 PDI 的影响

Fig. 2 Effect of ultrasonic power on the average particle size, emulsion yield and PDI of nanoemulsion

由图 2 可知,随着超声功率的增加,纳米乳液的平均粒径呈现先降低后增加的变化趋势,而乳化产

率呈现先增大后降低的变化趋势。在超声功率 480 W 时,纳米乳液的平均粒径最小且乳化产率最高,

故选择此超声功率 480 W 进行后续研究。对于上述变化的可能原因在于:超声功率的增大,米糠蛋白结构逐步解折叠,更多的疏水性氨基酸暴露于分子表面,增加了蛋白质的乳化性。然而超声功率过高时,米糠蛋白易出现局部聚集进而导致乳液平均粒径的增加,乳化油滴析出、乳化产率降低。由图亦可可知,低功率(100~200 W)超声处理下纳米乳液的 PDI 值较高,表明此处理条件下纳米乳液分布不均一,低功率超声处理难以有效制备稳定的纳米乳液。

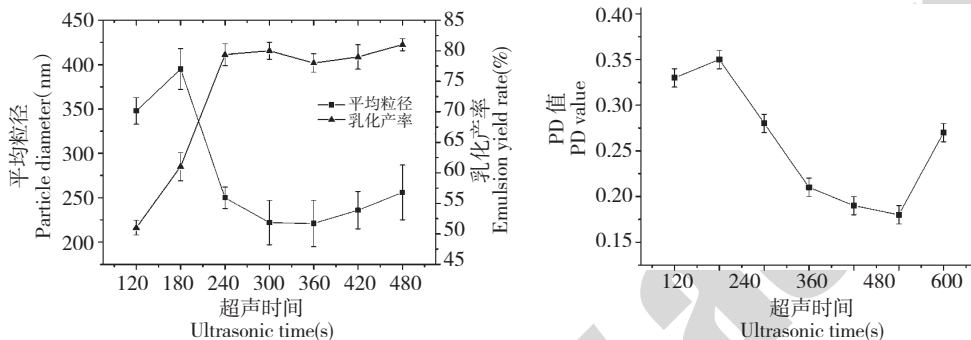


图3 超声时间对纳米乳液平均粒径、乳化产率及 PDI 的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic time on the average particle size, emulsion yield and PDI of nanoemulsion

由图3 超声时间对纳米乳液平均粒径及乳化产率的影响规律可知,随着超声时间的延长,纳米乳液的乳化产率呈增大趋势,当超声时间超过 240 s 后,纳米乳液的乳化产率不再随超声时间延长而继续增加。而纳米乳液的平均粒径随着超声时间延长呈现先增加后降低而后再增加。对比可知,超声时间为 300 s 时纳米乳液平均粒径有最小值,而此时纳米乳液的乳化产率亦有较大值,故选择此超声时间进行后续实验研究。通过比较可知,随着超声时间的增

而在所设置的高功率超声处理条件下,米糠蛋白纳米乳液 PDI 值较低,且随着超声功率从 300 W 提高至 500 W,纳米乳液 PDI 值趋于稳定,该超声功率可用于制备稳定的纳米乳液。

2.3 超声时间的单因素确定实验

本研究通过控制超声功率 360 W、超声温度 40 °C、米糠蛋白浓度 3%,考察不同超声时间(120、180、240、300、360、420、480 s)对纳米乳液平均粒径及乳化产率的影响规律,结果如图3所示。

加,米糠蛋白纳米乳液 PDI 值呈现先降低后增大的变化趋势,超声处理时间 300 s 时,纳米乳液 PDI 值较低,综合考虑粒径分布情况选择此条件进行后续研究。

2.4 米糠蛋白浓度的单因素确定实验

本研究通过控制超声功率 360 W、超声温度 40 °C、超声时间 240 s,考察不同米糠蛋白浓度(1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5%)对纳米乳液平均粒径及乳化产率的影响规律,结果如图3所示。

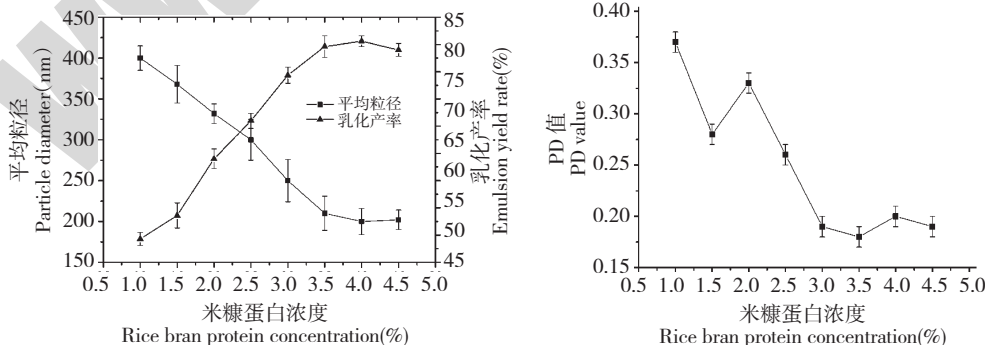


图4 米糠蛋白浓度对纳米乳液平均粒径、乳化产率及 PDI 的影响

Fig. 4 Effect of rice bran protein concentration on the average particle size, emulsion yield and PDI of nanoemulsion

由图4可知,随着米糠蛋白浓度的增加,米糠蛋白纳米乳液平均粒径呈降低的变化趋势,而乳化产

率呈增加的变化趋势,在米糠蛋白浓度为 4.0% 时,纳米乳液平均粒径最小且乳化产率较高。故选择米

糠蛋白浓度为 4.0% 作为后续研究的理想值进行实验。比较可知,随着米糠蛋白浓度的增加,纳米乳液 PDI 值总体呈降低的变化趋势,米糠蛋白浓度高于 3.0% 时,纳米乳液 PDI 趋于稳定,综合考虑米糠蛋白浓度为 4.0% 可以作为后续研究的理想参考值。

2.5 米糠蛋白纳米乳液超声乳化制备工艺响应面优化实验

本部分研究采用响应曲面优化法对米糠蛋白纳

米乳液超声乳化制备工艺进行优化,利用 Design-Expert 统计软件对数据进行分析处理。以超声温度 A(℃)、超声功率 B(W)、超声时间 C(s)及米糠蛋白浓度(%)分别代表的因素为自变量,设定 β -胡萝卜素纳米乳液平均粒径及乳化产率为响应值 R_1 和 R_2 ,由于在所设计的取值范围内纳米乳液 PDI 较低且稳定相近,故不将此值作为响应值进行考虑,响应面优化实验安排及结果见表 2。

表 2 实验安排及结果

Table 2 Experimental arrangement and results

试验号 No.	超声温度 A Ultrasonic temperature A (℃)	超声功率 B Ultrasonic power B (W)	超声时间 C Ultrasonic time C (s)	米糠蛋白浓度 Rice bran concentration D (%)	平均粒径 Particle diameter (nm)	乳化产率 Emulsion yield rate (%)
1	-1	-1	-1	-1	282	72.52
2	1	-1	-1	-1	288	74.12
3	-1	1	-1	-1	259	73.76
4	1	1	-1	-1	290	81.12
5	-1	-1	1	-1	215	80.15
6	1	-1	1	-1	226	81.44
7	-1	1	1	-1	232	81.34
8	1	1	1	-1	265	80.27
9	-1	-1	-1	1	224	76.74
10	1	-1	-1	1	240	86.13
11	-1	1	-1	1	188	83.85
12	1	1	-1	1	225	88.11
13	-1	-1	1	1	223	83.37
14	1	-1	1	1	252	85.87
15	-1	1	1	1	237	84.36
16	1	1	1	1	300	86.43
17	-2	0	0	0	239	77.21
18	2	0	0	0	290	89.56
19	0	-2	0	0	247	77.94
20	0	2	0	0	233	83.56
21	0	0	-2	0	200	76.36
22	0	0	2	0	203	84.24
23	0	0	0	-2	265	73.56
24	0	0	0	2	225	85.11
25	0	0	0	0	180	88.73
26	0	0	0	0	210	85.31
27	0	0	0	0	195	87.96
28	0	0	0	0	187	87.34
29	0	0	0	0	205	89.29
30	0	0	0	0	193	87.55

通过统计分析软件 Design-Expert 进行数据分

析,建立回归模型如下: $R_1 = 195.00 + 13.67A +$

$$0.75B-1.67C-10.33D+6.38AB+2.88AC+4.00AD+11.88BC-1.50BD+19.75CD+18.85A^2+12.73B^2+3.10C^2+13.98D^2$$

采用 Design-Expert 软件对模型方程进行方差分析,结果见表 3。

表 3 回归与方差分析结果

Table 3 The output of CLA regression and variance analysis results

变量 Variable	自由度 Degrees of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F value	Pr > F
A	1	4482.67	4482.67	44.6	< 0.0001
B	1	13.5	13.5	0.13	0.7191
C	1	66.67	66.67	0.66	0.4281
D	1	2562.67	2562.67	25.5	0.0001
AB	1	650.25	650.25	6.47	0.0225
AC	1	132.25	132.25	1.32	0.2693
AD	1	256	256	2.55	0.1313
BC	1	2256.25	2256.25	22.45	0.0003
BD	1	36	36	0.36	0.5584
CD	1	6241	6241	62.1	< 0.0001
A ²	1	9750.3	9750.3	97.01	< 0.0001
B ²	1	4444.3	4444.3	44.22	< 0.0001
C ²	1	264.3	264.3	2.63	0.1257
D ²	1	5360.01	5360.01	53.33	< 0.0001
回归	14	32240.28	2302.88	22.91	< 0.0001
剩余	15	1507.58	100.51		
失拟	10	889.58	88.96	0.72	0.693
误差	5	618	123.6		
总和	29	33747.87			

由表 3 回归与方差分析结果表可知,响应面优化拟合出的方程回归项极显著,且失拟项 $0.69 > 0.05$,而拟合方程的各因素指标与响应值之间的线性关系显著,且拟合模型方程的均方值 $R^2 = 95.53\%$, $R_{Adj}^2 = 91.36\%$,通过上述指标均可验证该模型方程可以用于本研究的实验拟合。通过 F 值

检验可知,依据 F 值大小由高至低以此为: $A > D > C > B$,即超声温度 > 米糠蛋白浓度 > 超声时间 > 超声功率。

两两因子的相互作用对于响应值影响的响应面分析如下图 5。

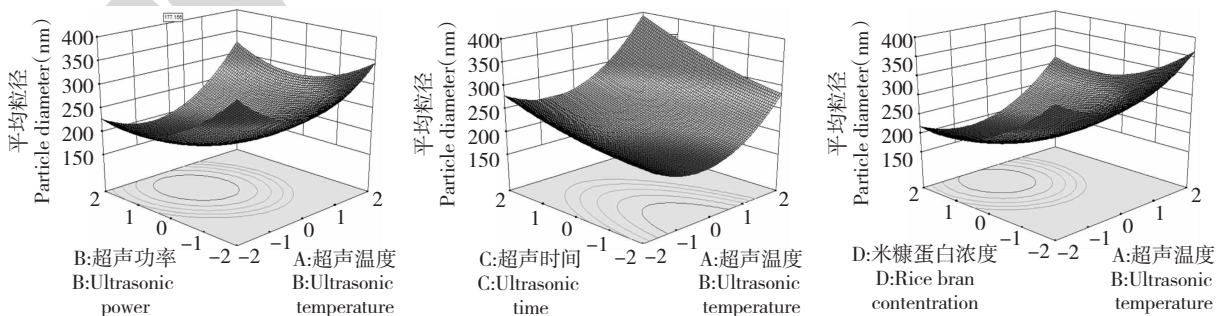


图 5 两因素交互作用对平均粒径影响的响应面图

Fig. 5 Response surface plots showing the impact of interaction of two factor on average particle size

应用响应面寻优分析方法对回归模型进行分析,超声温度 A(°C)、超声功率 B(W)、超声时间 C

(s) 及米糠蛋白浓度 (%) 对应的编码值分别为 0.56、0.99、-1.48 和 0.57, 即超声温度 47 °C, 超声功率 510 W, 超声时间 256 s 和米糠蛋白浓度 4.3%, 预计米糠蛋白纳米乳液理论平均粒径为 177 nm。

乳化产率 R_2 通过统计分析软件 Design-Expert 进行数据分析, 建立二次响应面回归模型如下:

$$R_2 = 87.70 + 2.17A + 1.26B + 1.78C + 3.05D - 0.13AB - 1.11AC + 0.57AD - 0.98BC + 0.15BD - 1.03CD - 1.03A^2 - 1.69B^2 - 1.80C^2 - 2.04D^2$$

表 4 回归与方差分析结果

Table 4 Results of regression and variance analysis

变量 Variable	自由度 Degrees of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F value	Pr > F
A	1	113.1	113.1	45.7	< 0.0001
B	1	37.85	37.85	15.29	0.0014
C	1	75.76	75.76	30.61	< 0.0001
D	1	223.5	223.5	90.31	< 0.0001
AB	1	0.29	0.29	0.12	0.7362
AC	1	19.85	19.85	8.02	0.0126
AD	1	5.11	5.11	2.06	0.1714
BC	1	15.52	15.52	6.27	0.0243
BD	1	0.35	0.35	0.14	0.7106
CD	1	16.97	16.97	6.86	0.0194
A ²	1	29.16	29.16	11.78	0.0037
B ²	1	78.32	78.32	31.65	< 0.0001
C ²	1	89.1	89.1	36	< 0.0001
D ²	1	114.54	114.54	46.28	< 0.0001
回归	14	733.29	52.38	21.16	< 0.0001
剩余	15	37.12	2.47		
失拟	10	27.6	2.76	1.45	0.3575
误差	5	9.52	1.9		
总和	29	770.41			

回归与方差分析结果表 4 可知, 响应面优化拟合出的方程回归项极显著, 且失拟项 $0.36 > 0.05$, 而拟合方程的各因素指标与响应值之间的线性关系显著, 且拟合模型方程的均方值 $R^2 = 95.18\%$, $R^2_{Adj} = 90.68\%$, 通过上述指标均可验证该模型方程可以用于本研究的实验拟合。通过 F 值检验可知, 依据 F 值大小由高至低以此为: $D > A > C > B$, 即米糠蛋白浓度 > 超声温度 > 超声时间 > 超声功率。两两因子的相互作用对于响应值影响的响应面分析如下图。

应用响应面寻优分析方法对回归模型进行分析, 确定最优工艺超声温度 A (°C)、超声功率 B (W)、超声时间 C (s) 及米糠蛋白浓度 (%) 对应的编码值分别为 0.71、0.4、0.41 及 0.71, 即超声温度

54 °C, 超声功率 492 W, 超声时间 312 s 和米糠蛋白浓度 4.4%, 预计纳米乳液的理论乳化产率为 90.01%。

为同步获取低平均粒径及高乳化产率的米糠蛋白纳米乳液, 采用联合求解法确定平均粒径及乳化产率均优的工艺条件下超声温度 A (°C)、超声功率 B (W)、超声时间 C (s) 及米糠蛋白浓度 (%) 对应的编码值分别为 0.06、0.46、-0.69 及 0.91, 即超声温度 50 °C, 超声功率 494 W, 超声时间 279 s 和米糠蛋白浓度 4.5%, 模拟预计在此处理条件下, 平均粒径为 187 nm, 乳化产率为 88.12%。为适应生产需求将上述处理工艺参数优化为超声温度 50 °C, 超声功率 490 W, 超声时间 280 s 和米糠蛋白浓度 4.5%,

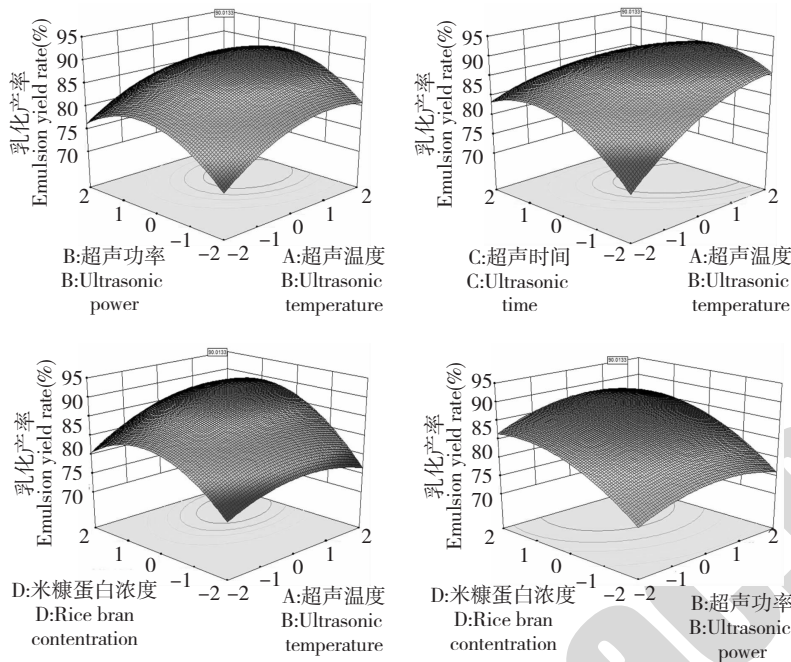


图6 两因素交互作用(显著项)对乳化产率影响的响应面图

Fig. 6 Response surface plots showing the significant effective interaction items of different parameters on protein emulsification rate

经实验验证此处理条件下,平均粒径为 190 nm,乳 化产率为 88.1%。

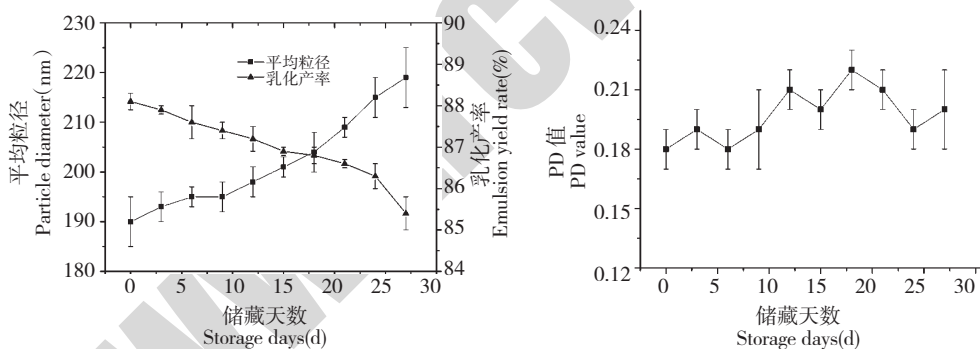


图7 纳米乳液储藏稳定性实验

Fig. 7 Storage stability test of nanoemulsion

为了验证纳米乳液的稳定性,对于最优条件下制备的纳米乳液进行了储藏稳定性试验,通过 27 d 的储藏验证实验发现,随着储藏天数的增加,本研究所制备的米糠蛋白纳米乳液平均粒径略有增加,乳化产率略有降低,PDI 值并未发生显著变化。纳米乳液的平均粒径、乳化产率及 PDI 值变化范围较小且在可接受范围内,综合比较可知纳米乳液具有较强的储藏稳定性。

3 结论

本研究拟采用超声乳化法制备米糠蛋白纳米乳

液,以期为新型功能性食品、纳米食品的开发提供技术途径及研发思路。通过响应面优化法获取了米糠蛋白纳米乳液超声乳化制备工艺,为使纳米乳液兼具低平均粒径及高乳化产率的优势,采用联合求解法确定超声乳化处理工艺参数为超声温度 50 ℃,超声功率 490 W,超声时间 280 s 和米糠蛋白浓度 4.5%,在此条件下米糠蛋白纳米乳液的平均粒径为 190 nm,乳化产率为 88.1%,兼具较强的储藏稳定性。

参考文献

1 Nel A, Xia T, Mädler L, *et al.* Toxic potential of materials at

- the nanolevel. *Science*, 2006, 311:622-627.
- 2 Sari TP, Mann B, Kumar R, *et al.* Preparation and characterization of nanoemulsion encapsulating curcumin. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43:540-546.
 - 3 Erramreddy VV, Ghosh S. Influence of emulsifier concentration on nanoemulsion gelation. *Langmuir*, 2014, 30:11062-11074.
 - 4 Rachmawati H, Yee CW, Rahma A. Formulation of tablet containing curcumin nanoemulsion. *Int J Pharm Pharmaceutical Sci*, 2014, 6:115-120.
 - 5 Bielinska AU, Makidon PE, Janczak KW, *et al.* Distinct pathways of humoral and cellular immunity induced with the mucosal administration of a nanoemulsion adjuvant. *J Immunol*, 2014, 192:2722-2733.
 - 6 Deshpande D, Kethireddy S, Gattacceca F, *et al.* Comparative pharmacokinetics and tissue distribution analysis of systemically administered 17- β -estradiol and its metabolites *in vivo* delivered using a cationic nanoemulsion or a peptide-modified nanoemulsion system for targeting atherosclerosis. *J Controlled Release*, 2014, 180:117-124.
 - 7 Ganta S, Singh A, Patel NR, *et al.* Development of EGFR-targeted nanoemulsion for imaging and novel platinum therapy of ovarian cancer. *Pharm Res*, 2014, 31:2490-2502.
 - 8 Mao LK, Xu DX, Yang J, *et al.* Effects of small and large molecule emulsifiers on the characteristics of β -carotene nanoemulsions prepared by high pressure homogenization. *Food Technol Biotechnol*, 2009, 47:336-342.
 - 9 Qian C, Decker EA, Xiao H, *et al.* Comparison of biopolymer emulsifier performance in formation and stabilization of orange oil-in-water emulsions. *J Am Oil Chem Soc*, 2011, 88(1):47-55.
 - 10 Charoen R, Jangchud A, Jangchud K, *et al.* Influence of interfacial composition on oxidative stability of oil-in-water emulsions stabilized by biopolymer emulsifiers. *Food Chem*, 2012, 131:1340-1346.
 - 11 Qian C, Decker EA, Xiao H, *et al.* Physical and chemical stability of β -carotene-enriched nanoemulsions; Influence of pH, ionic strength, temperature, and emulsifier type. *Food Chem*, 2012, 132:1221-1229.
 - 12 Cornacchia L, Roos YH. Stability of β -carotene in protein-stabilized oil-in-water delivery systems. *J Agric Food Chem*, 2011, 59:7013-7020.
 - 13 Chu BS, Ichikawa S, Kanafusa S, *et al.* Preparation of protein-stabilized β -carotene nanodispersions by emulsification - evaporation method. *J Am Oil Chem Soc*, 2007, 84:1053-1062.
 - 14 Leong TSH, Wooster TJ, Kentish SE, *et al.* Minimising oil droplet size using ultrasonic emulsification. *Ultrason Sonochem*, 2009, 16:721-727.
-
- (上接第 1029 页)
- 12 Yang KM (杨康敏), Yang L (杨柳), Zhu HB (朱海波). Establishment and dynamic of hamster models ultrasonic imaginff analysis of hyperlipidemia. *Chin J Comp Med* (中国比较医学杂志), 2013, 23(4):5-9.
 - 13 Liu QB, Lin N, Yu DR, *et al.* Hypolipidemic effect of aqueous leaf extract of *Carmona microphylla* G Don. *Trop J Pharm Res*, 2016, 15:1673-1680.
 - 14 Ma HF (马宏峰). Effect of LA on high fat mouse in lipid metabolism and its mechanisms. Hefei: Hefei University of Technology (合肥工业大学), MSc. 2007.
 - 15 Katiyar D, Singh B, Lall AM, *et al.* Efficacy of chitoooligosaccharides for the management of diabetes in alloxan induced mice; A correlative study with antihyperlipidemic and antioxidative activity. *Eur J Pharm Sci*, 2011, 44:534-543.
 - 16 Kang NH, Lee WK, Yi BR, *et al.* Risk of cardiovascular disease is suppressed by dietary supplementation with protamine and chitoooligosaccharide in Sprague-Dawley rats. *Mol Med Rep*, 2013, 7:127-133.
 - 17 Cho EJ, Rahman A, Kim SW, *et al.* Chitosan oligosaccharides inhibit adipogenesis in 3T3-L1 adipocytes. *J Microbiol Biotechnol*, 2008, 18:80-87.
 - 18 Dai XL, Chang P, Zhu QZ, *et al.* Chitosan oligosaccharides protect rat primary hippocampal neurons from oligomeric β -amyloid 1-42-induced neurotoxicity. *Neurosci Lett*, 2013, 554:64-69.
 - 19 Zong CL, Yu Y, Song GH, *et al.* Chitosan oligosaccharides promote reverse cholesterol transport and expression of scavenger receptor BI and CYP7A1 in mice. *Exp Biol Med*, 2012, 237:194-200.
 - 20 Choi EH, Yang HP, Chun HS. Chitoooligosaccharide ameliorates diet-induced obesity in mice and affects adipose gene expression involved in adipogenesis and inflammation. *Nutr Res*, 2012, 32:218-228.
 - 21 Rahman A, Kumar SG, Kim SW, *et al.* Proteomic analysis for inhibitory effect of chitosan oligosaccharides on 3T3-L1 adipocyte differentiation. *Proteomics*, 2008, 8:569-581.
 - 22 Liu JN, Zhang JL, Xia WS. Hypocholesterolaemic effects of different chitosan samples *in vitro* and *in vivo*. *Food Chem*, 2008, 107:419-425.
 - 23 Zhang JL, Liu JN, Li L, *et al.* Dietary chitosan can effectively improve hypercholesterolemia in rats fed high-fat diets. *Nutr Res*, 2008, 28:383-390.