

基于 GA-BP 神经网络优化北五味子籽油微胶囊制备工艺

王申申, 张超, 王艳梅*

(黑龙江工业学院 资源工程学院, 黑龙江 鸡西 158100)

摘要: 该研究以北五味子籽油微胶囊包埋率为指标, 在单因素试验基础上设计 Box-Behnken 响应面实验, 以响应面实验数据为基础构建反向传播 (back propagation, BP) 人工神经网络模型, 并以遗传算法 (genetic algorithm, GA) 优化喷雾干燥法制备北五味子籽油微胶囊的工艺条件。结果表明, 以吐温-80、十聚甘油单硬脂酸酯和少量 95% 乙醇为乳化剂制备北五味子籽油, 经 BP 训练和遗传算法迭代 52 寻优后, 预测得出北五味子籽油微胶囊制备最优工艺为大豆分离蛋白与麦糊精质量比 1.441 0:1、壁材与北五味子籽油质量比为 2.168 2:1、进风口温度 161.786 7 °C、进料泵速 18.448 8 mL/min, 最大包埋率 97.57%。在预测条件下, 将工艺参数调整为大豆分离蛋白与麦糊精质量比 1.44:1、壁材与北五味子籽油质量比为 2.17:1、进风口温度 162 °C、进料泵速 18.4 mL/min, 此时微胶囊包埋率为 94.87%、水分含量 2.12%、溶解度 93.6%、堆密度 0.296 g/cm³, 密封避光储存 6 个月包埋率仍高于 75%, 且微胶囊过氧化值远低于未经任何处理的北五味子籽油。该研究构建的 BP 模型具有较小误差和精确预测性能, 所制微胶囊性质稳定, 对五味子籽油包埋和保护效果较好。

关键词: 北五味子籽油; 喷雾干燥; 微胶囊; 反向传播 (BP) 人工神经网络; 遗传算法 (GA)

Study on the Preparation and Properties of *Schisandra chinensis* Seed Oil Microcapsules Based on GA-BP Neural Network

WANG Shenshen, ZHANG Chao, WANG Yanmei*

(Department of resource engineering, Heilongjiang University of Technology, Jixi 158100, Helongjiang, China)

Abstract: In this research, the encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules was chosen as the focal parameter. A Box-Behnken response surface experiment was designed based on single-factor experiments. With the data obtained in the response surface experiment, a back propagation (BP) artificial neural network model was developed, and the process conditions to prepare the microcapsules by spray drying were optimized using a genetic algorithm (GA). The findings indicated that in the case of using Tween-80, decaglycerol monostearate, and a small quantity of 95% ethanol as emulsifiers to prepare *Schisandra chinensis* seed oil, the optimal conditions for preparing the microcapsules were predicted as follows after BP training and 52 iterations of optimization through the genetic algorithm: mass ratio of soybean protein isolate to maltodextrin: 1.441 0:1; mass ratio of wall material to seed oil: 2.168 2:1; inlet air temperature: 161.786 7 °C; feed pump rate: 18.448 8 mL/min, with a maximum encapsulation efficiency of 97.57% achieved. Under the approximate optimized conditions (mass ratio of soybean protein isolate to maltodextrin to be 1.44:1, mass ratio of wall material to seed oil to be 2.17:1, inlet air temperature of 162 °C, and feed pump rate of 18.4 mL/min), the actual encapsulation efficiency recorded was 94.87% with moisture content of 2.12%, solubility of 93.6%, and a bulk density of 0.296 g/cm³. In addition, the encapsulation efficiency was maintained above 75% after six months of storage under sealed and light-protected conditions. The peroxide value of the microcapsules was considerably lower than that of the untreated *Schisandra chinensis* seed oil. It is concluded that the BP model developed in this study displayed small errors and reliable predictive capability. The produced microcapsules

基金项目: 黑龙江省 2023 年大学生创新创业训练计划项目 (202311445018S)

作者简介: 王申申 (2004—), 男 (汉), 本科在读, 研究方向: 计算机技术。

*通信作者: 王艳梅 (1976—), 女, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术。

were stable and offered effective encapsulation and protection for *Schisandra chinensis* seed oil.

Key words: *Schisandra chinensis* seed oil; spray drying; microencapsulated; back propagation (BP) artificial neural network; genetic algorithm

引文格式:

王申申,张超,王艳梅.基于GA-BP神经网络优化北五味子籽油微胶囊制备工艺[J].食品研究与开发,2024,45(23):117-125.

WANG Shenshen, ZHANG Chao, WANG Yanmei. Study on the Preparation and Properties of *Schisandra chinensis* Seed Oil Microcapsules Based on GA-BP Neural Network[J]. Food Research and Development, 2024, 45(23): 117-125.

微胶囊是以天然或合成的高分子材料作为壁材形成薄膜覆于芯材表面,形成具有一定形态结构和功能特性的直径为1~5 000 nm的微粒。食品工业常以多糖或蛋白类物质作为成膜壁材,将对外界环境敏感、不稳定,但具有良好生物活性芯材(如食品添加剂、益生菌、风味和营养物质、溶解性差的油脂等)微胶囊化,以提高芯材氧化稳定性,解决芯材溶解性差、缓释、利用率低等问题^[1-4]。喷雾干燥法利用高温将壁材与芯材混合形成的乳液瞬间蒸发,形成微胶囊粉末,该方法具有操作成本低、设备易得、工艺流程简便、生产能力高等优点,是目前在食品行业中应用最广泛的微胶囊制备方法^[5-7]。

北五味子是药食同源食品,富含多种化学成分,包括木脂素类、挥发油类、多糖、有机酸、萜类、黄酮类等化学成分^[8],具有提高学习记忆能力^[9]、镇静催眠^[10]、延缓衰老^[11]及降糖降脂^[12-13]、保肝^[14-15]、抗病毒^[16]等多种功效。在功能食品领域具有较大的应用前景。国内外学者已从五味子属植物中分离出150多种木脂素类单体化合物^[17],有明显生物活性单体有五味子甲素、乙素、醇甲、醇乙等;北五味子籽油中五味子甲素、乙素和醇甲含量分别为0.125%、0.952%和0.755%^[18];甲素通过对小胶质细胞极化的调节,缓解阿尔茨海默病小鼠认知障碍,抑制其脑组织凋亡^[19];乙素能清除自由基、抑制白色念珠菌和金黄色葡萄球菌^[20];醇甲可通过抑制神经元的焦亡和凋亡而有效改善阿尔茨海默病小鼠的认知能力^[21]。醇甲和乙素具有抗氧化和保护胰岛细胞发挥降血糖作用^[11]。此外,北五味子油中不饱和脂肪酸含量为92.86%^[18],不饱和脂肪酸在预防心血管疾病方面有良好作用^[22]。由此可见,北五味子籽油具有食用和保健价值,极具研发和应用潜力。

反向传播(back propagation, BP)神经网络是由输入层、隐藏层和输出层组成的人工神经网络中的一种,输入层接收信号、隐藏层接收输入层的信息,将处理后的信息传递至下一层,以此类推直至输出层;训练过程中工作信号正向传递、误差反向传播,通过反向传播的误差更新网络权重和阈值,具有较强的学习、非线性映

射、泛化、容错能力,被广泛应用于实际生产流程中关键参数的预测与优化。

目前对北五味子籽油乳化和微胶囊化的研究鲜有报道,本研究在用复合乳化剂将北五味子籽油制成粒径小、稳定性好的乳液基础上,选择合适壁材采用喷雾干燥法,将北五味子籽油微胶囊化,同时以响应面试验数据为输入层,构建以微胶囊包埋率为输出层的BP神经网络,通过相关系数及实测包埋率与预测包埋率比较来判断模型可靠性,并以此模型输出值为目标构建自适应函数,用遗传算法(genetic algorithm, GA)整体寻优确定最佳工艺和最大包埋率,并分析微胶囊包埋率、含水率、粒径等指标,以期为北五味子籽油的开发应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

五味子:采摘于黑龙江鸡西虎林林业局;95%十聚甘油单硬脂酸酯(食品级):安徽中旭生物技术有限公司;大豆分离蛋白(食品级):哈尔滨黎明植物蛋白科技有限责任公司;吐温-80、95%乙醇、NaCl、石油醚(均为分析纯):山东华昱化工科技有限公司;麦芽糊精(生物试剂):北京索莱宝科技有限公司;北五味子籽油:黑龙江工业学院发酵食品实验室压榨制备。

1.2 仪器与设备

LPG-5型离心喷雾干燥机:常州市苏力干燥设备有限公司;FS-600N超声波处理器:广州德科生物科技有限公司;BT-9300Z型激光粒度分布仪:丹东市百特仪器有限公司;FA2004N型电子天平:上海精密科学仪器有限公司;KL05A离心机:湖南凯达科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 北五味子籽油微胶囊制备

将吐温-80、95%十聚甘油单硬脂酸酯与北五味子籽油按质量比1:1:5混合,加入少量助乳化剂(95%乙醇),加入1% NaCl溶液促进乳液粒径均匀集中,超声乳化2 min制得乳液,以此乳液作为微胶囊芯材,再将

大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)和麦芽糊精一定质量比混合作为壁材加入乳液中,保持固形物含量为20%,将加入壁材后乳浊液500 W再超声2次,每次2 min,在一定条件下经喷雾干燥得北五味子籽油微胶囊(*Schisandra chinensis* seed oil microcapsules, SSOM)。

1.3.2 单因素及响应面优化试验设计

选取对微胶囊包埋效果和性质有较大影响的因素:壁材原料质量比(大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比)、荷载比(壁材与北五味子籽油质量比)、进风口温度、进料泵速4个因素为变量,进行单因素试验。固定进料泵速12 mL/min、大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比2:2、壁材与北五味子籽油质量比3:2、进风口温度160℃,探究SPI与麦芽糊精质量比(1:2、2:2、3:2、4:2、6:2)、壁材与五味子籽油质量比(1:2、2:2、3:2、4:2、5:2)、进料泵速[4、8、12、16、20 (mL/min)]、进风口温度(140、150、160、170、180℃)对北五味子籽油微胶囊包埋率影响。

以北五味子籽油微胶囊包埋率为响应值,在单因素试验基础上分别选A大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比、B壁材与北五味子籽油质量比、C进风口温度、D进料泵速为自变量,根据Box-Behnken试验设计方法进行四因素三水平响应面分析试验,因素与水平见表1。

表1 响应面试验因素与水平设计
Table 1 Factors and levels of response surface experiment

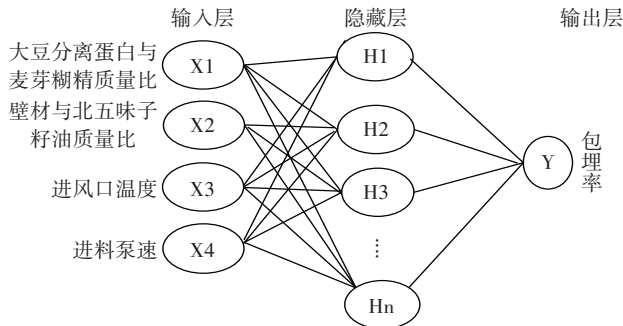
水平	A 大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比	B 壁材与北五味子籽油质量比	C 进风口温度/℃	D 进料泵速/(mL/min)
-1	1:2	2:2	150	12
0	2:2	3:2	160	16
1	3:2	4:2	170	20

1.3.3 BP神经网络建模训练喷雾干燥法制备北五味子籽油微胶囊工艺

以均方差(即预测值与目标值间的差值平方和的均值)作为反向传播损失函数,用Matlab R2021b软件构建预测喷雾干燥法制备北五味子籽油微胶囊最佳工艺参数和包埋率模型,如图1所示。

1.3.4 微胶囊包埋率的测定

准确称取4 g制得微胶囊置于干燥三角瓶中,分3次加入90 mL石油醚,每次振荡2 min后过滤,合并滤液至已干燥恒重圆底烧瓶中,60℃除去滤液溶剂,待质量恒定后称圆底烧瓶质量,圆底烧瓶质量增加量即为所得即为微胶囊表面油质量(m_1);微胶囊总油质量测定需在过滤前超声15 min,破坏微胶囊结构,使其



X1、X2、X3、X4为神经网络输入自变量。

图1 预测北五味子籽微胶囊包埋率的BP神经网络模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of BP neural network model of encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

失去对五味子籽油包埋作用,使得油全部溶于石油醚中,包埋率($B, \%$)计算公式如下^[23]。

$$B = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中: m_1 为微胶囊总油质量,g; m_2 为微胶囊表面油质量,g。

1.3.5 微胶囊粉体品质特性、粒径及贮藏时过氧化值测定

1)堆密度:参考李艳^[24]方法测定微胶囊堆密度。

2)粒径:将微胶囊溶于水,用纳米激光粒度分布仪测其粒径分布。

3)水分含量:参考GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法测定。

4)溶解度:称取5.0 g五味子籽油微胶囊样品,常温下分3次加入35 mL蒸馏水溶解样品,4 000 r/min离心10 min,弃上清液;沉淀中再加入35 mL蒸馏水,上下摇动使沉淀悬浮,再次4 000 r/min离心10 min,弃上清液,将沉淀105℃烘至恒重,溶解度($R, \%$)计算公式如下。

$$R = \left[1 - \frac{w_2 - w_1}{(1 - a) \times w} \right] \times 100$$

式中: w 为样品质量,g; w_1 为称量皿质量,g; w_2 为称量皿和不溶物总质量,g; a 为样品水分含量,%。

4)过氧化值(peroxide value, POV):将微胶囊和少量五味子籽油室温密闭条件下避光贮存6个月,每隔1个月测定包埋率和过氧化值,研究其贮存期间氧化稳定性,过氧化值测定方法参考GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的第一法进行测定。

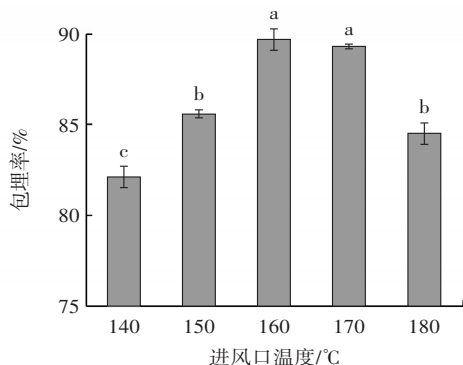
1.4 数据处理

通过Design Expert 12设计Box-Behnken响应面试验试验数据进行回归分析,Matlab R2021b软件进行BP训练与GA寻优。

2 结果与分析

2.1 喷雾干燥制备北五味子微胶囊单因素试验结果

不同进风口温度对北五味子籽油微胶囊包埋率影响如图2所示。



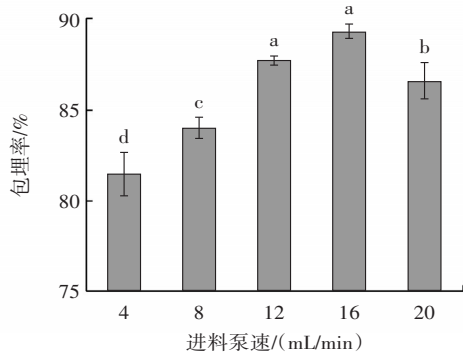
不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图2 进风口温度对北五味子籽油微胶囊包埋率影响

Fig.2 Effect of the inlet air temperature on encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

由图2可知,当进风口温度低于160℃时,包埋率随进风口温度升高而增大;进风口温度高于160℃后,包埋率下降,这可能是进风口温度高导致液滴成膜速度过快,膜内未能及时扩散到表面蒸发水分受热变成蒸汽,体积增大胀破囊膜,导致芯材高温下挥发,从而微胶囊包埋率降低,因此选择进风口温度150、160、170℃进行后续响应面优化试验。

不同进料泵速对北五味子籽油微胶囊包埋率影响如图3所示。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

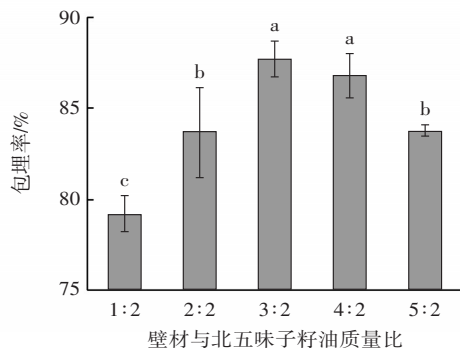
图3 进料泵速对北五味子籽油微胶囊包埋率影响

Fig.3 Effect of the feed pump rate on encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

由图3可知,进料泵速低于16 mL/min,包埋率随进料泵速增加而增加;泵速超过16 mL/min时,包埋率随进料泵速增加而减少。原因可能由于进料速度太快,微囊与干燥气体热交换时间短,导致溶剂蒸发不完全,这不利于形成均匀稳固的壁膜,微胶囊对芯材保护能力下降,导致包埋率下降;此外,溶剂蒸发不完全导

致干燥后微囊含大量溶剂,这会使微胶囊黏结聚集成团甚至贴壁,并且贮存时微胶囊所含水分加速不稳定芯材的损失,因此选择进料泵速12、16、20 mL/min进行后续响应面优化试验。

不同壁材与北五味子籽油质量比对北五味子微胶囊包埋率影响如图4所示。



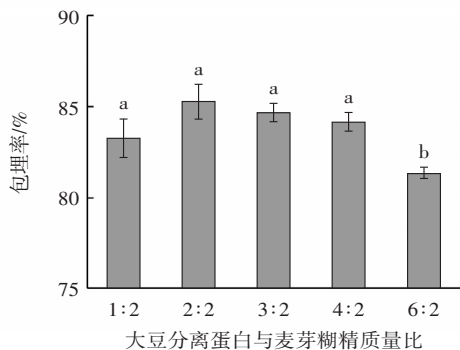
不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图4 壁材与北五味子籽油质量比对北五味子籽油微胶囊包埋率影响

Fig.4 Effect of the mass ratio of wall material to *Schisandra chinensis* seed oil on encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

由图4可知,壁材与北五味子籽油质量比小于3:2时,包埋率随壁材添加量增加而增大,二者质量比高于3:2,包埋率随壁材添加量增加反而降低,可能是壁材添加量过多导致液膜厚度增加,从而导致传热过程中热阻变大,热交换不充分,溶剂蒸发速率慢,不利于形成均匀成壁膜,不能很好保护芯材导致微胶囊包埋率下降,因此选择壁材与北五味子籽油质量比为2:2、3:2、4:2进行后续响应面优化试验。

不同大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比对北五味子籽油微胶囊包埋率影响如图5所示。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。

图5 大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比对北五味子籽油微胶囊包埋率影响

Fig.5 Effect of the mass ratio of soybean protein isolate to maltodextrin on encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

由图 5 可知,大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比 2:2 时,微胶囊包埋率最好,因此选择大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比 1:2、2:2、3:2 进行后续响应面优化试验。

2.2 响应面优化试验结果及分析

2.2.1 响应面模型建立及试验结果

响应面试验设计及结果如表 2 所示。

表 2 响应面试验设计及试验结果
Table 2 Design and results of response surface experiment

序号	A 大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比	B 壁材与北五味子籽油质量比	C 进风口温度	D 进料泵速	包埋率/%	
					实测值	预测值
1	0	-1	-1	0	62.12	63.78
2	-1	0	0	1	84.16	84.27
3	0	0	0	0	89.54	90.82
4	1	1	0	0	91.12	90.85
5	-1	1	0	0	79.81	77.89
6	1	0	0	-1	87.35	87.48
7	1	0	0	1	90.80	90.51
8	-1	0	1	0	84.69	85.52
9	1	0	-1	0	85.12	85.11
10	-1	-1	0	0	73.95	73.16
11	0	1	-1	0	81.80	81.47
12	0	0	0	0	91.13	90.82
13	0	0	-1	1	77.75	77.55
14	0	0	1	-1	82.04	81.17
15	0	-1	1	0	80.86	81.43
16	-1	0	-1	0	73.04	74.28
17	0	0	0	0	89.64	90.82
18	-1	0	0	-1	75.97	76.50
19	0	1	1	0	83.29	81.87
20	0	0	1	1	90.52	91.83
21	1	-1	0	0	76.59	77.44
22	0	0	0	0	92.54	90.82
23	0	-1	0	1	70.64	68.61
24	0	0	0	0	91.23	90.82
25	1	0	1	0	92.34	91.92
26	0	1	0	1	90.93	92.02
27	0	1	0	-1	69.43	72.28
28	0	0	-1	-1	79.78	77.41
29	0	-1	0	-1	77.82	77.55

采用 Design Expert 12 软件对表 2 试验结果进行二次多项回归拟合,包埋率回归方程如下。

$$Y=90.82+4.31A+4.53B+4.51C+2.7D+2.17AB-1.11AC-1.18AD-4.13BC+7.17BD-1.95A^2+9.03B^2-4.65C^2-4.17D^2$$

2.2.2 回归模型显著性检验
对回归模型进行方差分析,对模型系数进行显著性检验,结果见表 3。

表 3 回归方程方差分析
Table 3 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 754.08	14	125.29	42.81	<0.000 1	**
A 大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比	222.74	1	222.74	76.1	<0.000 1	**
B 壁材与北五味子籽油质量比	246.61	1	246.61	84.26	<0.000 1	**
C 进风口温度	244.17	1	244.17	83.42	<0.000 1	**
D 进料泵速	87.53	1	87.53	29.91	<0.000 1	**
AB	18.79	1	18.79	6.42	0.023 9	*
AC	4.91	1	4.91	1.68	0.216 4	
AD	5.62	1	5.62	1.92	0.187 6	
BC	74.39	1	74.39	25.42	0.000 2	**
BD	205.64	1	205.64	70.26	<0.000 1	**
CD	27.62	1	27.62	9.43	0.008 3	**
A ²	24.76	1	24.76	8.46	0.011 4	*
B ²	528.48	1	528.48	180.56	<0.000 1	**
C ²	140.41	1	140.41	47.97	<0.000 1	**
D ²	112.93	1	112.93	38.58	<0.000 1	**
残差	40.98	14	2.93			
失拟项	34.72	10	3.47	2.22	0.229 7	
纯误差	6.25	4	1.56			
总误差	1 795.06	28				

注:*表示影响显著, $P<0.05$;**表示影响极显著, $P<0.01$ 。

由表 3 可知,该回归方程模型 $P<0.01$,影响极显著,失拟项 $P=0.229 7>0.05$,方程拟合不足检验不显著,校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.954 3$,表明约有 95% 变异率分布在 4 个因素中,可见响应曲面回归方程能很好拟合本试验所得结果,自变量与响应值之间线性关系显著,该模型可以用于喷雾干燥制备五味子籽油微胶囊工艺条件理论预测。此响应面模型预测北五味子籽油包埋最优工艺条件为大豆分离蛋白与麦芽糊精质量比 1.50:1、壁材与北五味子籽油质量比 2.11:1、进风口温度 163.07 ℃、进料泵速 19.25 mL/min 时,最佳包埋率为 96.385%。

2.2.3 各因素交互作用响应面

各因素交互作用响应面如图 6 所示。

由图 6 可知,AB、BC、BD 和 CD 交互作用响应曲面较为陡峭,等高线形状趋近于椭圆形,说明两两因素交互作用明显,AB 两因素交互对包埋率影响显著,BC、BD、CD 两因素交互作用对包埋率影响极显著;AC、AD 曲面较平滑,说明两两因素交互作用不显著,且两因素交互对包埋率影响作用不显著。

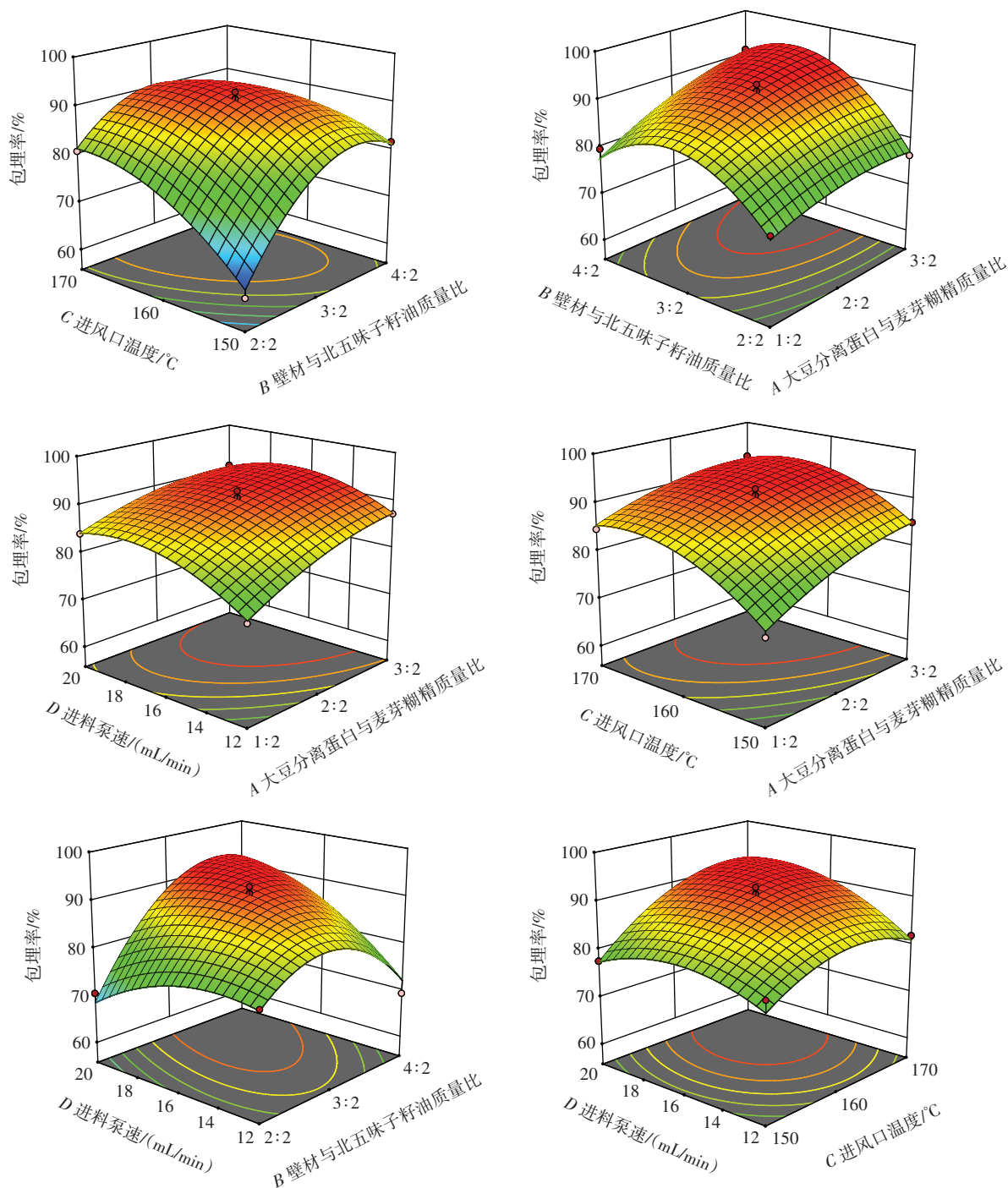


图6 各因素交互作用的响应面和等高线

Fig.6 Response surface and contour plots of interaction of experimental factors

2.3 BP 人工神经网络训练及 GA 优化结果

2.3.1 BP 人工神经网络模型预测精度评价

在 BP 神经网络训练过程中,样本数据被划分为训练集、验证集和测试集 3 类数据集。本研究中训练集占总数据集的 70%,用于模型训练;验证集合测试集各占总数据集的 15%,分别用于模型的验证和测试。BP 人工神经网络模型训练回归分析如图 7 所示。

由图 7 可知,隐藏层为 9 时,训练集、验证集、测试

集和全部数据相关系数 R^2 分别是 0.999 99、0.967 04、0.945 18、0.984 89,说明三者显著正相关,BP 神经网络构建的模型预测精度较好。

以测试集 9 组试验测得实际包埋率与神经网络预测值相比较,进一步验证所建立的 BP 人工神经网络模型性能,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,试验测得微胶囊包埋率与神经网络模型预测值变化基本趋势一致,进一步说明通所构建

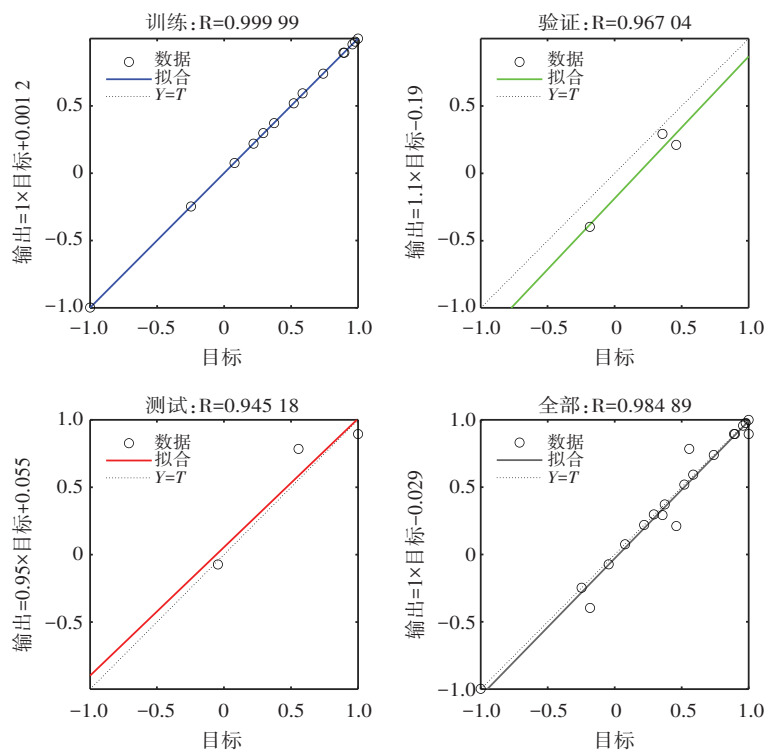


图7 BP 人工神经网络模型训练回归分析

Fig.7 Regression analysis of BP artificial neural network model training

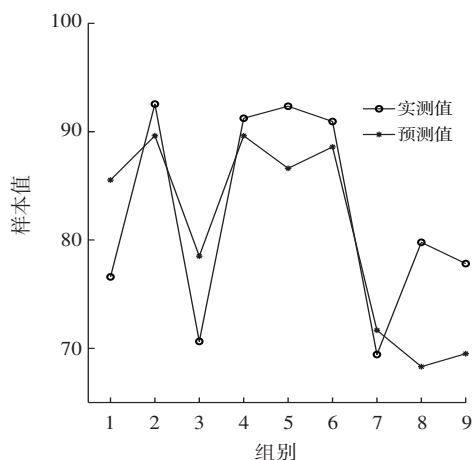


图8 北五味子籽油微胶囊包埋率 BP 人工神经网络模型性能验证

Fig.8 Validation of the BP artificial neural network model of encapsulation efficiency of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

的神经网络模型输出的预测值可靠性高。

2.3.2 GA 遗传算法优化微胶囊包埋率最佳工艺结果

遗传算法是一种由计算机模拟自然界生物遗传观点,通过自然选择、遗传、变异等遗传机制和达尔文进化论,实现种群个体适应性的提高,可用于多目标优化,寻优速度较快,常用于优化传统搜索算法难以解决的非线性问题,遗传算法优化包埋率适应度函数的迭代变化曲线如图9所示。

由图9可知,可见随着迭代次数增加,北五味子籽

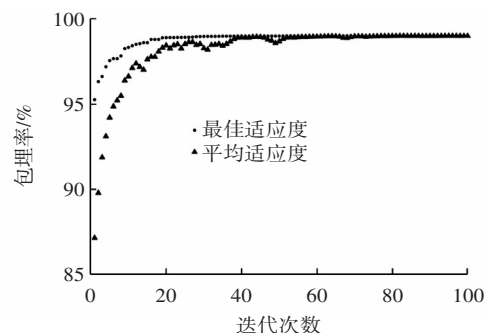


图9 微胶囊包埋率种群适应度函数迭代变化曲线

Fig.9 Iteration curve of population fitness of encapsulation efficiency of microcapsules

油微胶囊包埋率呈曲折上升的趋势,种群迭代进化52代以后,包埋率达最大值,适应度函数趋于平稳,GA-BP模型预测壁材原料大豆分离蛋白与麦糊精质量比1.441 0:1、壁材与油质量比2.168 2:1、进风口温度161.786 7℃、进料泵速18.448 8 mL/min时,预测最佳包埋率为97.57%。经GA遗传算法寻优后的BP网络模型均方根差(root mean square difference,RMSE)(1.19)优于响应面(1.71),可知GA-BP网络模型预测精度更好。

2.4 北五味子籽油微胶囊粉体性质及储存稳定性检验结果

2.4.1 北五味子籽油微胶囊粉体性质

以大豆分离蛋白与麦糊精质量比1.44:1、壁材与

北五味子籽油质量比 2.17:1、进风口温度 162℃、进料泵速 18.4 mL/min 工艺条件制备北五味子籽油微胶囊,检测其包埋率、水分含量、堆密度、溶解度和粒径,并将微胶囊和五味子籽油室温避光放置 6 个月,检测这期间内微胶囊包埋率变化及无任何保护措施 of 北五味子籽油与微胶囊的过氧化值,结果如图 10、图 11 及表 4 所示。

由图 10、图 11 可知,贮存 3 个月内微胶囊产品包埋率无明显变化,从第 4 月起微胶囊包埋率开始下降,贮存到第 6 个月微胶囊包埋率比刚制得时下降约 15%,但包埋率仍高于 75%。贮存过程中,微胶囊产品

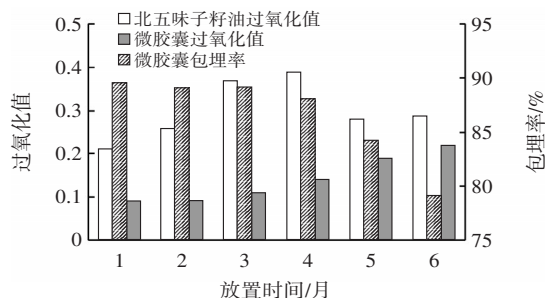


图 10 北五味子籽油与北五味子籽油微胶囊稳定性检验

Fig.10 Iteration curve of population fitness of encapsulation efficiency of microcapsules

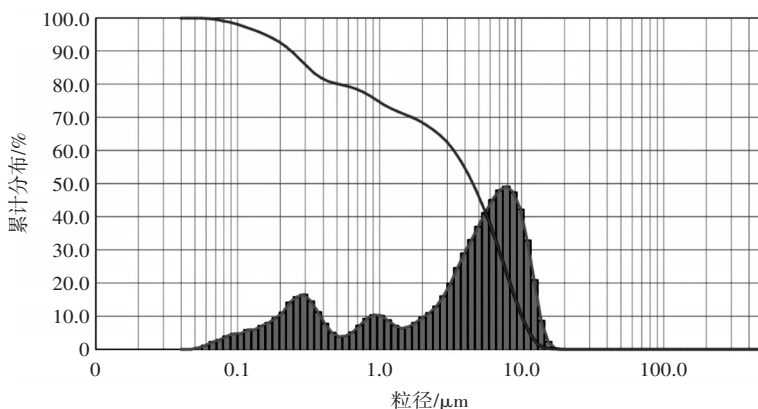


图 11 北五味子籽油微胶囊颗粒粒径频率分布曲线

Fig.11 Particle size frequency distribution curve of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

表 4 北五味子籽油微胶囊性质及粒径

Table 4 Properties and particle size of *Schisandra chinensis* seed oil microcapsules

包埋率/%	水分含量/%	堆密度/(g/cm ³)	溶解度/%	微胶囊粒径			粒径区间内粒子含量/%		
				D ₅₀ /μm	D ₉₀ /μm	D _[4,3] /μm	≤1.08 μm	1.08~5.88 μm	5.88~11.59 μm
94.87	2.12	0.296	93.6	4.75	8.03	4.39	22.93	42.22	34.85

注:D₅₀为中位径;D₉₀为累积分布百分数达 90% 时对应的粒径值;D_[4,3]为体积平均径。

过氧化值随时间延长而升高,但仍远低于北五味子籽油,这说明微胶囊可减少北五味子籽油被氧化程度。由表 4 可知,微胶囊粒径相对较小且分布范围相对集中,这可能与喷雾干燥前北五味子籽油乳液粒径小稳定性好有关,制得的北五味子籽油微胶囊水分含量为 2.12%,此水平水分含量微胶囊贮藏时不易吸湿结块发霉;堆密度为 0.296 g/cm³,说明产品间空隙大、流动性好;溶解度为 93.6%,说明微胶囊溶解性较好。

3 结论

本文以吐温-80 与十聚甘油单硬脂酸酯等质量混合作为乳化剂,将北五味子籽油超声乳化,再以一定质量比的大豆分离蛋白和麦糊精为壁材,喷雾干燥制备北五味子籽油微胶囊;以响应面试验数据为基础,构建 BP 神经网络模型预测、GA 遗传算法优化喷雾干燥工

艺条件,经 BP 训练和遗传算法迭代 52 寻优后,预测得出北五味子籽油微胶囊制备最优工艺为大豆分离蛋白与麦糊精质量比 1.441 0:1、壁材与北五味子籽油质量比 2.168 2:1、进风口温度 161.786 7℃、进料泵速 18.448 8 mL/min,最大包埋率 97.57%;经 GA 寻优后的 BP 网络模型 RMSE(1.19)优于响应面(1.71),GA-BP 网络模型预测精度优于响应面预测。

当大豆分离蛋白与麦糊精质量比 1.44:1、壁材与北五味子籽油质量比 2.17:1、进风口温度 162℃、进料泵速 18.4 mL/min 时,制备北五味子籽油微胶囊包埋率为 94.87%、水分含量 2.12%、溶解度 93.6%、堆密度 0.296 g/cm³,密封避光储存 6 个月包埋率仍高于 75%,且微胶囊过氧化值远低于未经任何处理的北五味子籽油,说明微胶囊对五味子籽油包埋和保护效果较好。北五味子籽油中含丰富木脂素类化合物而具有极高的

药用和营养价值,但其水不溶性限制其应用,将其经乳化包埋喷雾干燥制备成微胶囊,为在食品药品领域应用提供方法和途径。

参考文献:

- [1] CHOUDHURY N, MEGHWAL M, DAS K. Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods[J]. Food Frontiers, 2021, 2(4): 426-442.
- [2] ARENAS-JAL M, SUÑÉ-NEGRE J M, GARCÍA-MONTOYA E. An overview of microencapsulation in the food industry: Opportunities, challenges, and innovations[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(7): 1371-1382.
- [3] 李永权, 陈英威, 曾祥彦, 等. 益生菌微胶囊技术食品级壁材的研究进展[J]. 食品工业, 2023, 44(10): 185-190.
LI Yongquan, CHEN Yingwei, ZENG Xiangyan, et al. Research progress of food-grade wall materials based on probiotics microcapsule technology[J]. The Food Industry, 2023, 44(10): 185-190.
- [4] YAN C, KIM S R, RUIZ D R, et al. Microencapsulation for food applications: A review[J]. ACS Applied Biomaterials, 2022, 5(12): 5497-5512.
- [5] DHAKAL S P, HE J B. Microencapsulation of vitamins in food applications to prevent losses in processing and storage: A review[J]. Food Research International, 2020, 137: 109326.
- [6] DANTAS A, PIELLA-RIFÀ M, COSTA D P, et al. Innovations in spray drying technology for liquid food processing: Design, mechanisms, and potential for application[J]. Applied Food Research, 2024, 4(1): 100382.
- [7] 张天恒, 王立, 李言. 微胶囊技术在粮油食品加工中的应用进展[J/OL]. 国粮学报: 1-13[2024-08-14]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000851>.
ZHANG Tianheng, WANG Li, LI Yan. Application progress of microcapsule technology in cereal and oil food processing[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association: 1-13[2024-08-14]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000851>.
- [8] 邢楠楠, 屈怀东, 任伟超, 等. 五味子主要化学成分及现代药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(15): 210-218.
XING Nannan, QU Huaidong, REN Weichao, et al. Main chemical constituents and modern pharmacological action of *Schisandra chinensis* fructus: A review[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2021, 27(15): 210-218.
- [9] 郭笑, 叶玉洁, 宋昆, 等. 五味子木脂素改善衰老小鼠学习记忆能力的机制[J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(14): 85-91.
GUO Xiao, YE Yujie, SONG Kun, et al. Mechanism of *Schisandra chinensis* fructus lignans in alleviating learning and memory ability in D-gal[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2020, 26(14): 85-91.
- [10] WANG M Y, LI N, JING S, et al. Schisandrin B exerts hypnotic effects in PCPA-treated rats by increasing hypothalamic 5-HT and γ -aminobutyric acid levels[J]. Exp Ther Med, 2020, 20(6): 142.
- [11] Kopustinskiene D M, Bernatoniene J. Antioxidant effects of *Schisandra chinensis* fruits and their active constituents[J]. Antioxidants (Basel), 2021, 10(4): 620.
- [12] 梁华, 彭博伟, 王燕, 等. 五味子有效成分的降糖作用及机制研究探析[J]. 辽宁中医药大学学报, 2021, 23(8): 1-5.
LIANG Hua, PENG Bowei, WANG Yan, et al. Research analysis of hypoglycemic effect and mechanism of wuweizi(*Schisandra chinensis* fructus) active components[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 23(8): 1-5.
- [13] JIN D, ZHAO T, FENG W W, et al. *Schisandra* polysaccharide increased glucose consumption by up-regulating the expression of GLUT-4[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 87: 555-562.
- [14] LI X K, LI M Y, DENG S, et al. A network pharmacology-integrated metabolomics strategy for clarifying the action mechanisms of *Schisandra chinensis* fructus for treating drug-induced liver injury by acetaminophen[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2021, 31: 115992.
- [15] YUAN R S, TAO X, LIANG S, et al. Protective effect of acidic polysaccharide from *Schisandra chinensis* on acute ethanol-induced liver injury through reducing CYP2E1-dependent oxidative stress[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy = Biomedecine & Pharmacotherapie, 2018, 99: 537-542.
- [16] 刘媛媛, 黄仕其, 李玉泽, 等. 五味子属植物木脂素类化学成分及其药理作用研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(6): 1903-1918.
LIU Yuanyuan, HUANG Shiqi, LI Yuze, et al. Research progress on lignans and pharmacological activities in plants of *Schisandra*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(6): 1903-1918.
- [17] 杨放, 袁军, 付平. 五味子的研究概况[J]. 华西药学杂志, 2003, 18(6): 438-440.
YANG Fang, YUAN Jun, FU Ping. General situation of research on *Schisandra chinensis*[J]. West China Journal of Pharmaceutical Sciences, 2003, 18(6): 438-440.
- [18] 刘长姣, 张守勤, 孟宪梅. 五味子种子油脂和挥发油的成分分析[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 52-56.
LIU Changjiao, ZHANG Shouqin, MENG Xianmei. Analysis of components in oil and volatile oil from seeds of *Schisandra chinensis*(Turcz.) Bail[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 52-56.
- [19] WANG Q, LIU L, GUAN H B, et al. Schizandrin A ameliorates cognitive functions via modulating microglial polarisation in Alzheimer's disease mice[J]. Pharmaceutical Biology, 2021, 59(1): 860-867.
- [20] 李斌, 孟宪军, 薛雪, 等. 北五味子乙素清除自由基及体外抑菌作用研究[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 79-82.
LI Bin, MENG Xianjun, XUE Xue, et al. Free radical-scavenging and antimicrobial activities of schizandrin B from *Schisandra chinensis*[J]. Food Science, 2011, 32(5): 79-82.
- [21] LI Q, WANG Q, GUAN H B, et al. Schizandrin inhibits NLRP1 inflammasome-mediated neuronal pyroptosis in mouse models of Alzheimer's disease[J]. Neuropsychiatric Disease and Treatment, 2021, 17: 261-268.
- [22] MANNINEN S, LANKINEN M, ERKKILÄ A, et al. The effect of intakes of fish and *Camelina sativa* oil on atherogenic and anti-atherogenic functions of LDL and HDL particles: A randomized controlled trial[J]. Atherosclerosis, 2019, 281: 56-61.
- [23] 刘晓丽, 魏长庆, 詹晓北, 等. 超声辅助制备草鱼鱼油微胶囊及其贮藏稳定性和降血脂作用研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 163-168.
LIU Xiaoli, WEI Changqing, ZHAN Xiaobei, et al. Ultrasonic-assisted preparation, stability, and reducing blood lipid of fish oil microcapsule from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 163-168.
- [24] 李艳. 核桃油的提取及微胶囊化制备技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
LI Yan. Study on extraction and microencapsulation of walnut oil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006.

责任编辑:张璐

收稿日期:2024-06-26