

# 亚麻油微胶囊制备及其对冷藏鸡肉品质的影响

李新明<sup>1</sup>,郝文来<sup>2</sup>,韩海望<sup>2</sup>,李群<sup>1\*</sup>

(1. 山西农业大学 山西省功能食品研究院,山西 太原 030006;2. 深圳市诚致生物开发有限公司,广东 深圳 518000)

**摘要:**以阿拉伯胶、 $\beta$ -环糊精为壁材原料,以亚麻油为芯材,通过喷雾干燥法制备亚麻油微胶囊。以单因素试验选择固形物浓度、阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精质量比、壁材与芯材质量比、搅拌时间、进风温度的适当取值范围,以包埋率为考察指标,使用响应面 Box-Behnken 设计方案对生产进行工艺优化,获得最优工艺参数为进风温度 179 °C、阿拉伯胶与 $\beta$ -环糊精质量比 6:1、固形物浓度 26%、搅拌时间 36 min、壁材与芯材质量比 5:1。在此工艺条件下亚麻油微胶囊包埋率为 97.82%。高温贮藏试验表明,微胶囊包埋对亚麻油成分具有较好地稳定作用,可有效地抑制亚麻油的品质退化。冷藏试验结果表明,鸡肉经亚麻油微胶囊复合液涂膜处理后,在 8 d 的贮藏过程中,可维持较好的品质。

**关键词:** 亚麻油;微胶囊;包埋率;膜;鸡肉

## Preparation of Linseed Oil Microcapsules and Its Effect on the Quality of Refrigerated Chicken Meat

LI Xinming<sup>1</sup>, HAO Wenlai<sup>2</sup>, HAN Haiwang<sup>2</sup>, LI Qun<sup>1\*</sup>

(1. Shanxi Institute of Functional Foods, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;  
2. Shenzhen Chengzhi Biotechnology Development Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** The linseed oil microcapsules were prepared by the spray drying method using Arabic gum and  $\beta$ -cyclodextrin as the wall material and linseed oil as the core material. The appropriate value ranges of solid concentration, mass ratio of Arabic gum to  $\beta$ -cyclodextrin, mass ratio of wall material to core material, stirring time, and air inlet temperature were selected by single factor test. Taking the embedding rate as the investigation index, the production process was optimized by using the response surface Box-Behnken design scheme. The optimal process parameters were as follows: air inlet temperature 179 °C, Arabic gum to  $\beta$ -cyclodextrin ratio 6:1, solid concentration 26%, stirring time 36 min, and wall material to core material ratio 5:1. Under these conditions, the embedding rate of linseed oil microcapsules was 97.82%. High temperature storage test showed that microencapsulation could stabilize the change of linseed oil composition and effectively inhibit the quality degradation of linseed oil. The results of cold storage test showed that the fresh quality of chicken meat could be maintained well during 8 d of storage after being coated with linseed oil microcapsule compound solution.

**Key words:** linseed oil; microcapsules; embedding rate; film; chicken meat

引文格式:

李新明,郝文来,韩海望,等. 亚麻油微胶囊制备及其对冷藏鸡肉品质的影响[J]. 食品研究与开发,2024,45(6):120-127.

LI Xinming, HAO Wenlai, HAN Haiwang, et al. Preparation of Linseed Oil Microcapsules and Its Effect on the Quality of Refrigerated Chicken Meat[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 120-127.

亚麻作为世界上重要的油料作物之一,在我国种植面积很广<sup>[1]</sup>。现代医学研究发现亚麻油中的亚麻酸

在心血管疾病预防方面有一定功效,同时还具有促进大脑发育、提高免疫力等作用<sup>[2-4]</sup>。由于亚麻油中含有

基金项目:山西省科技成果转化计划项目(202104021301037);深圳市科技计划项目(KCXFZ20201221173611030)

作者简介:李新明(1970—),男(汉),副研究员,博士,研究方向:食品科学与工程。

\*通信作者:李群(1970—),男(汉),研究员,本科,研究方向:食品科学与工程。

大量的多不饱和脂肪酸,如亚油酸、亚麻酸<sup>[5-6]</sup>,因此有较高的营养价值。另外,亚麻酸还有较好的抗氧化、抗菌活力<sup>[7-11]</sup>,在医药及食品工业有较高的应用价值。

微胶囊技术在食品加工领域长期得到应用,该技术采用成膜材料(壁材)包裹固体或液体(芯材),形成半渗透或密封的微胶囊结构<sup>[12-13]</sup>,从而使被包埋材料得到较好地保存,同时可以便捷地运输和贮藏。将亚麻油包裹进微胶囊中,能有效限制其挥发。通过微胶囊的缓释作用释放亚麻油和膜的屏障作用以延长被涂膜物质的货架期。

喷雾干燥法具有低成本和技术操作简单等优点,在当前食品工业中,常被用来制备油脂微胶囊<sup>[14-15]</sup>。本试验以亚麻油为芯材,以阿拉伯胶和β-环糊精为壁材,采用喷雾干燥法对亚麻油进行微胶囊化,以达到延缓亚麻油品质下降的目的。鸡肉在贮运过程中常发生肉质腐败品质退化,严重影响了它的食用价值,如果利用亚麻油的抗菌、抗氧化作用,通过微胶囊包裹亚麻油和涂膜工艺研究对鸡肉的贮藏保鲜,具有重要的应用意义。采用亚麻油微胶囊复合液涂膜处理鸡肉,检测涂膜处理后冷藏鸡肉品质的变化,为亚麻油在鸡肉贮运加工中的应用提供科学依据,增大亚麻油在食品和卫生领域的应用范围。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜亚麻油:油料精制于山西农业大学功能食品研究院实验室;阿拉伯胶、β-环糊精:山东滨州智源生物科技有限公司;吐温 80:上海源叶生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

旋转蒸发器(YRE-2000A型):巩义市予华仪器有限责任公司;电热恒温干燥箱(DHG-9141A):杭州汇尔仪器设备有限公司;置顶式电动搅拌器(HD2015W):上海司乐仪器有限公司;数显恒温水浴锅(HH-S4型):常州国宇仪器制造有限公司;高压均质机(APV-1000):上海顺仪实验设备有限公司;喷雾干燥机(Bioq-8000):汇和堂生物工程设备(上海)有限公司;SC-80C型全自动色差计:彩谱科技(浙江)有限公司;乳化分散机(SilversonL5M):上海森澜精密仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 亚麻油微胶囊的制备

将阿拉伯胶、β-环糊精按一定质量比溶入纯净水中,再加入适量吐温 80,搅拌混合获得壁材溶液,接着加入亚麻油,在 50℃下使用乳化分散机将乳液样品以 14 000 r/min 处理,将所得乳化混合液进行喷雾干燥,获得亚麻油微胶囊。

#### 1.3.2 包埋率的分析计算和色度分析

按照如下公式计算微胶囊的包埋率( $B, \%$ )。

$$B = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100$$

式中: $W_0$ 为微胶囊总油量,g; $W_1$ 为微胶囊表面含油量,g。

色度分析:色彩系统以 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 表示, $L^*$ 代表亮度变量, $a^*$ 和 $b^*$ 代表色度坐标。将鸡肉切成均匀的3 cm×3 cm×0.2 cm的肉片,每片肉平行测定10次取平均值,每个样品平行测定5次。

#### 1.3.3 单因素试验

在阿拉伯胶与β-环糊精质量比6:1、壁材与芯材质量比5:1、搅拌时间35 min、进风温度180℃的条件下,测定固形物浓度分别为5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%的条件下微胶囊的包埋率;在固形物浓度25%、壁材与芯材质量比5:1、搅拌时间35 min、进风温度180℃的条件下,测定阿拉伯胶与β-环糊精质量比分别为1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、6:1、7:1的条件下微胶囊的包埋率;在固形物浓度25%、阿拉伯胶与β-环糊精质量比6:1、搅拌时间35 min、进风温度180℃的条件下,测定壁材与芯材质量比分别为1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、6:1、7:1的条件下微胶囊的包埋率;在固形物浓度25%、阿拉伯胶与β-环糊精质量比6:1、壁材与芯材质量比5:1、进风温度180℃的条件下,测定搅拌时间分别为10、15、20、25、30、35、40 min的条件下微胶囊的包埋率;在固形物浓度25%、阿拉伯胶与β-环糊精质量比6:1、壁材与芯材质量比5:1、搅拌时间35 min的条件下,测定进风温度分别为160、170、180、190、200℃的条件下微胶囊的包埋率。

#### 1.3.4 亚麻油微胶囊响应面分析优化条件

在单因素试验基础上,选择固形物浓度、阿拉伯胶与β-环糊精质量比、壁材与芯材质量比、搅拌时间、进风温度为考察因素,以包埋率为响应值,利用响应面法(Box-Behnken中心组合)进行响应面分析。试验方案如表1。

表1 响应面试验因素和水平

Table 1 Response surface experiment factors and levels

水平	A 固形物浓度/%	B 搅拌时间/min	C 壁材与芯材质量比	D 阿拉伯胶与β-环糊精质量比	E 进风温度/℃
-1	20	30	4:1	5:1	170
0	25	35	5:1	6:1	180
1	30	40	6:1	7:1	190

#### 1.3.5 贮藏过程中微胶囊中亚麻油成分的变化

将微胶囊放在恒温箱中,在50℃温度下贮藏15 d,参考文献[16]的方法,利用气相色谱检测被包埋亚麻油中的成分变化,并与新鲜亚麻油进行对比分析,以便评估微胶囊包埋亚麻油的作用。

### 1.3.6 亚麻油微胶囊涂膜液的制备、涂膜处理及冷藏

将一定质量比的玉米淀粉、甘油与蒸馏水加入容器中,搅拌混合均匀,在 85 °C 的水浴锅中边加热边不断搅拌处理 25 min;冷却到室温后,加入亚麻油微胶囊至最终浓度为 4%,40 °C 搅拌 50 min,备用。

将鸡肉分成两组,即对照组和处理组。对照组:将鸡肉浸入不含亚麻油微胶囊的玉米淀粉、甘油与蒸馏水质量比 4:1:100 涂液中 1 min,取出沥干备用;处理组:将鸡肉浸入含亚麻油微胶囊的玉米淀粉、甘油与蒸馏水质量比 4:1:100 涂液中 1 min,取出沥干备用。将两组鸡肉放入冷库中,在 4 °C 中冷藏 8 d,每 2 d 取样测试。

### 1.3.7 肉质质分析

肉色泽参考文献[17]的方法测定,肉的嫩度(剪切力)和总挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)值参考文献[18]的方法测定,肉的 pH 值参考文献的方法[19]测定,肉中菌落总数参考文献[20]的方法测定。

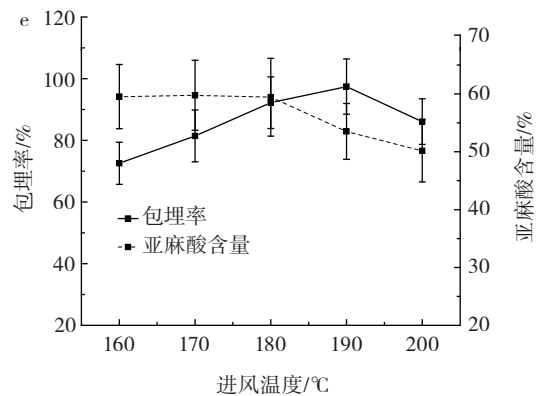
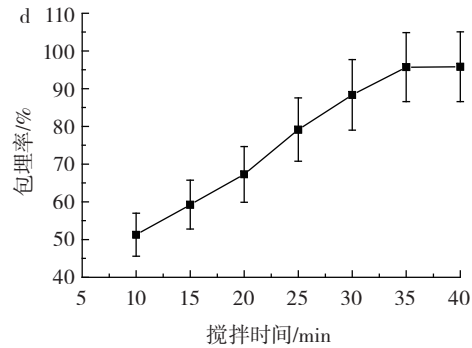
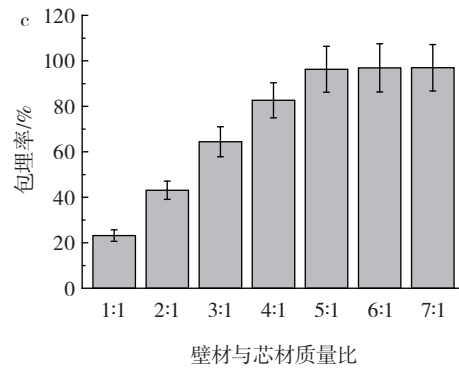
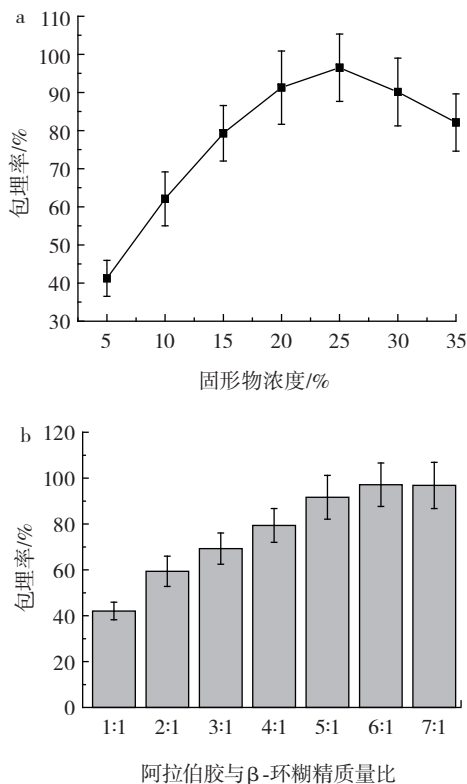
### 1.4 数据分析

采用 Origin 9.0 软件进行试验图表绘制,采用 Design-Expert 8.0.6 统计软件进行响应面优化分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素分析结果

固形物浓度、阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比、壁材与芯材质量比、搅拌时间和进风温度对亚麻油包埋率的影响见图 1。



a. 固形物浓度;b. 阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比;c. 壁材与芯材质量比;d. 搅拌时间;e. 进风温度。

图 1 5 个单因素对亚麻油包埋率的影响

Fig.1 Effect of five single factors on the embedding rate of linseed oil

由图 1a 可知,随着固形物浓度的增加,包埋率先增加后降低,在固形物浓度为 25% 时,包埋率达到最大值(96.48±8.82)%之后,包埋率开始降低。综合考虑,试验选择固形物浓度 20% 至 30% 为最适取值。由图 1b 可知,随着阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比的增加,包埋率先增加,在阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比为 6:1 时,包埋率达到最大值(97.11±9.47)%,之后包埋率开始降低。综合考虑,试验选择阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比 5:1 至 7:1 为最适取值。由图 1c 可知,随着壁材与芯材质量比值的增加,包埋率起先增加,在壁材与芯材质量比值为 5:1 时,包埋率达到最大值(96.29±10.08)%,之后包埋率不再明显增加。综合考虑,试验选

择壁材与芯材质量比 4:1 至 6:1 为最适取值。由图 1d 可知,随着搅拌时间的延长,包埋率持续增加,在搅拌时间为 35 min 时,包埋率达到最大值(95.71±9.15)%,之后包埋率不再明显增加。综合考虑,试验选择搅拌时间 30~40 min 为最适取值。由图 1e 可知,随着进风温度的增加,包埋率先增加,在进风温度为 190 °C 时,包埋率达到最大值(97.35±8.90)%,之后包埋率开始下降。而在进风温度为 160~180 °C 时,微胶囊包埋油中亚麻酸含量维持在最大值范围(59.53±5.55)%~(59.43±6.72)%,后随温度增加,亚麻酸含量开始降低。综合考虑,试验选择进风温度 170~190 °C 为最适取值。

2.2 响应面分析

2.2.1 响应面优化方案及分析

响应面优化方案及试验结果见表 2。

表 2 响应面试验测定结果

Table 2 Determination results of response surface test

试验号	A 固形物浓度/%	B 搅拌时间/min	C 壁材与芯材质量比	D 阿拉伯胶与β-环糊精质量比	E 进风温度/°C	包埋率/%
1	20	30	5:1	6:1	180	83.91
2	30	30	5:1	6:1	180	89.95
3	20	40	5:1	6:1	180	84.97
4	30	40	5:1	6:1	180	90.89
5	25	35	4:1	5:1	180	84.82
6	25	35	6:1	5:1	180	86.56
7	25	35	4:1	7:1	180	91.56
8	25	35	6:1	7:1	180	91.96
9	25	30	5:1	6:1	170	83.99
10	25	40	5:1	6:1	170	85.59
11	25	30	5:1	6:1	190	89.96
12	25	40	5:1	6:1	190	91.78
13	20	35	5:1	6:1	180	84.91
14	30	35	5:1	6:1	180	89.97
15	20	35	6:1	6:1	180	84.78
16	30	35	6:1	6:1	180	91.11
17	25	35	5:1	5:1	170	80.17
18	25	35	5:1	7:1	170	87.03
19	25	35	5:1	5:1	190	86.94
20	25	35	5:1	7:1	190	93.37
21	25	30	4:1	6:1	180	90.25
22	25	40	4:1	6:1	180	91.37
23	25	30	6:1	6:1	180	91.07
24	25	40	6:1	6:1	180	92.07
25	20	35	5:1	5:1	180	80.31
26	30	35	5:1	5:1	180	86.77
27	20	35	5:1	7:1	180	86.08
28	30	35	5:1	7:1	180	93.57
29	25	35	4:1	6:1	170	83.97
30	25	35	6:1	6:1	170	85.97
31	25	35	4:1	6:1	190	90.11
32	25	35	6:1	6:1	190	91.11
33	20	35	5:1	6:1	170	80.01
34	30	35	5:1	6:1	170	85.62

续表 2 响应面试验测定结果

Continue table 2 Determination results of response surface test

试验号	A 固形物浓度/%	B 搅拌时间/min	C 壁材与芯材质量比	D 阿拉伯胶与β-环糊精质量比	E 进风温度/°C	包埋率/%
35	20	35	5:1	6:1	190	86.96
36	30	35	5:1	6:1	190	93.09
37	25	30	5:1	5:1	180	84.61
38	25	40	5:1	5:1	180	85.43
39	25	30	5:1	7:1	180	89.77
40	25	40	5:1	7:1	180	91.88
41	25	35	5:1	6:1	180	96.78
42	25	35	5:1	6:1	180	97.1
43	25	35	5:1	6:1	180	96.97
44	25	35	5:1	6:1	180	97.22
45	25	35	5:1	6:1	180	96.04
46	25	35	5:1	6:1	180	97.02

2.2.2 模型方程的建立及显著性试验

响应面回归系数模型及方差分析结果见表 3。

表 3 响应面回归系数模型及方差分析

Table 3 Response surface regression coefficient model and variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	930.99	20	46.55	105.61	<0.000 1	**
A	147.8	1	147.8	335.34	<0.000 1	**
B	5.14	1	5.14	11.67	0.002 2	**
C	5.26	1	5.26	11.92	0.002 0	**
D	152.58	1	152.58	346.18	<0.000 1	**
E	152.89	1	152.89	346.88	<0.000 1	**
AB	3.60×10 <sup>-3</sup>	1	3.60×10 <sup>-3</sup>	8.17×10 <sup>-3</sup>	0.928 7	
AC	0.78	1	0.78	1.78	0.194 5	
AD	0.75	1	0.75	1.7	0.204 5	
AE	0.024	1	0.024	0.055	0.817 3	
BC	0.19	1	0.19	0.44	0.513 6	
BD	0.12	1	0.12	0.27	0.607 9	
BE	0.37	1	0.37	0.84	0.367 0	
CD	0.45	1	0.45	1.02	0.322 6	
CE	0.25	1	0.25	0.57	0.458 4	
DE	0.13	1	0.13	0.3	0.587 3	
A <sup>2</sup>	265.38	1	265.38	602.09	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	99.77	1	99.77	226.35	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	85.56	1	85.56	194.11	<0.000 1	**
D <sup>2</sup>	205.52	1	205.52	466.27	<0.000 1	**
E <sup>2</sup>	236.76	1	236.76	537.16	<0.000 1	**
残差	11.02	25	0.44			
失拟项	9.61	20	0.48	1.71	0.289 1	
纯误差	1.41	5	0.28			
总方差	942.01	45				

注:\*\*表示影响极显著(P<0.01)。

使用 Design-Expert V8.0.6 软件对试验数据进行优化分析,获得模拟方程:包埋率/ $\% = 96.86 + 3.06A + 0.65B + 0.48C + 3.10D + 3.19E - 0.030AB + 0.32AC + 0.26AD + 0.13AE - 0.030BC + 0.32BD + 0.055BE - 0.34CD - 0.25CE - 0.11DE - 5.57A^2 - 3.52B^2 - 3.18C^2 - 4.91D^2 - 5.34E^2$ 。回归方程方差分析计算结果表明,该优化模型极显著( $P < 0.0001$ ),失拟项( $P = 0.2891 > 0.05$ )不显著,表明该模型有效<sup>[21]</sup>。试验模型确定系数  $R^2 = 98.58\%$ ,表明亚麻油微胶囊包埋率的变化有 98.58% 来自于选择因素,调整确定系数  $R^2_{Adj} = 97.44\%$ ,表明 97.44% 的微胶囊亚麻油包埋率的响应值变化能用模型来解释。该模型试验测量值与预测值间有良好的拟合性,能用于微胶囊亚麻油的包埋工艺试验与预测<sup>[22]</sup>。分析还表明,一次项 A(固形物浓度)、B(搅拌时间)、C(壁材与芯材质量比)、D(阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比)、E(进风温度)对亚麻油包埋率影响极显著( $P < 0.01$ ),顺序为  $E > D > A > C > B$ 。

### 2.2.3 微胶囊包埋最佳工艺验证

采用 Design Expert 8.0 软件进行统计学分析,获得亚麻油微胶囊理论最优参数:进风温度 179 °C、阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比 6:1、固形物浓度 26%、搅拌时间 36 min、壁材与芯材质量比 5:1。在此工艺条件下亚麻油微胶囊包埋率的理论值为 97.00%,实际值为 97.82%,表明此工艺可行。

### 2.3 微胶囊包埋亚麻油的作用评估

微胶囊中的亚麻油色谱分析见图 2。

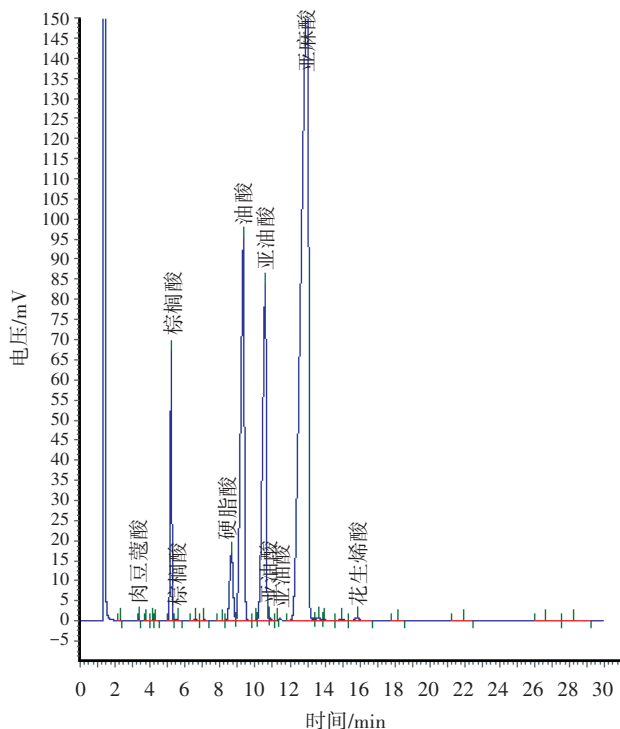


图2 微胶囊中的亚麻油色谱分析

Fig.2 Chromatographic analysis of embedded linseed oil in microcapsules

由图 2 可知,经 50 °C 温度下贮藏 15 d,包埋亚麻油中的主要成分是棕榈酸(4.9381)、棕榈酸(0.0722)、硬脂酸(2.8940)、油酸(16.8061)、亚油酸(15.1281)、亚麻酸(59.4678)。

新鲜亚麻油色谱分析见图 3。

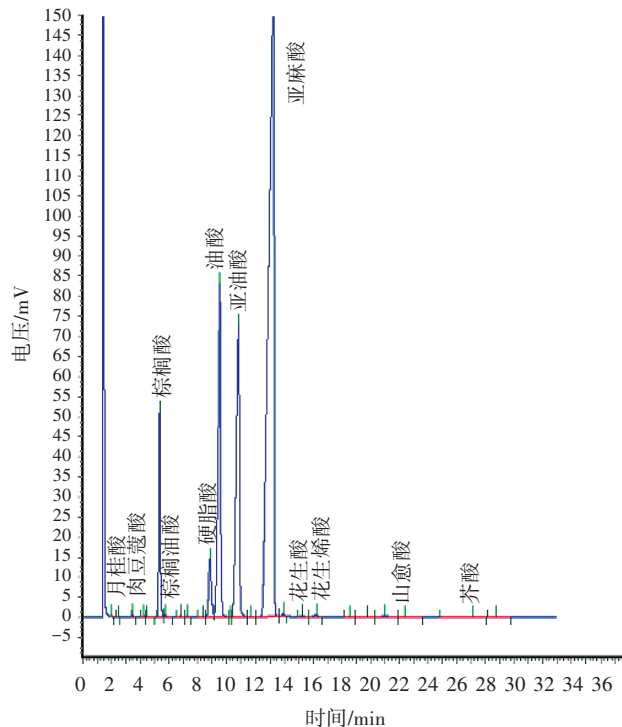


图3 新鲜亚麻油色谱分析

Fig.3 Chromatographic analysis of fresh linseed oil

由图 3 可知,新鲜亚麻油中的主要成分是棕榈酸(4.9728)、棕榈油酸(0.0833)、硬脂酸(2.8704)、油酸(16.9356)、亚油酸(15.2622)、亚麻酸(59.3599)。对比分析能看出,两份样品的主要成分没有明显变化。这表明微胶囊包埋亚麻油能够对贮藏油的品质起到稳定作用。

### 2.4 亚麻油微胶囊复合膜对冷藏鸡肉品质的影响

色泽是鸡肉的品质特性之一。还原状态的肌红蛋白呈现紫红色,氧合肌红蛋白呈现亮红色,高铁肌红蛋白呈褐色<sup>[25]</sup>。亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉色泽的影响见表 4。

由表 4 可知,两组的亮度值均随时间的延长持续上升,在第 6 天达到最高,之后开始降低;与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理的冷藏鸡肉亮度值在各时间点均较高,在第 6、8 天差异显著( $P < 0.05$ ),亚麻油微胶囊复合膜处理可以较好地抑止冷藏鸡肉颜色的变化。两组的红度值均随时间的延长持续降低,与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理的冷藏鸡肉红度值在各时间点均较高,在第 4、6、8 天差异显著( $P < 0.05$ ),表明亚麻油微胶囊复合膜处理能够较好地阻止肌红蛋

表4 亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉色泽的影响

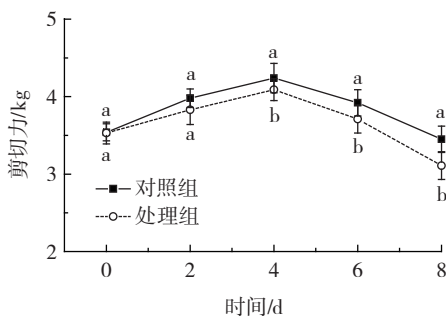
Table 4 Effect of linseed oil microcapsule composite film on the color of frozen chicken meat

时间/d	亮度值(L*)		红度值(a*)		黄度值(b*)	
	对照组	处理组	对照组	处理组	对照组	处理组
0	59.21±1.47 <sup>a</sup>	59.16±1.29 <sup>b</sup>	1.18±0.08 <sup>a</sup>	1.17±0.07 <sup>a</sup>	10.68±0.75 <sup>a</sup>	10.72±0.57 <sup>b</sup>
2	59.85±1.38 <sup>a</sup>	59.9±1.11 <sup>b</sup>	0.93±0.02 <sup>a</sup>	0.99±0.03 <sup>a</sup>	11.43±0.69 <sup>a</sup>	11.22±0.74 <sup>b</sup>
4	60.63±1.52 <sup>a</sup>	60.95±1.47 <sup>b</sup>	0.79±0.03 <sup>b</sup>	0.85±0.04 <sup>b</sup>	13.37±0.89 <sup>a</sup>	12.03±0.84 <sup>b</sup>
6	60.97±1.01 <sup>a</sup>	63.37±1.02 <sup>a</sup>	0.62±0.03 <sup>b</sup>	0.78±0.03 <sup>b</sup>	14.63±0.88 <sup>a</sup>	12.95±0.92 <sup>a</sup>
8	59.12±1.09 <sup>a</sup>	62.78±0.93 <sup>a</sup>	0.52±0.02 <sup>b</sup>	0.71±0.03 <sup>b</sup>	15.28±1.12 <sup>a</sup>	13.54±0.99 <sup>a</sup>

注:同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

白被氧化成高铁肌红蛋白。两组的黄度值均随时间的延长持续增加,与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理的冷藏鸡肉黄度值在各时间点均较低,在第6、8天差异显著( $P<0.05$ ),表明亚麻油微胶囊复合膜处理组冷藏鸡肉脂肪没有产生剧烈氧化反应,这可能与亚麻酸的抗氧化作用有关<sup>[7-8]</sup>。

剪切力是反映肉质品质的特性之一,肉的剪切力越高,肉的嫩度越低,反之,肉的嫩度越高<sup>[26]</sup>。亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉剪切力的影响见图4。



不同字母表示两组不同时间差异显著( $P<0.05$ )。

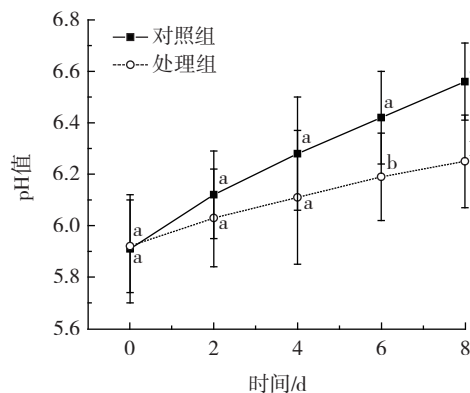
图4 亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉剪切力的影响

Fig.4 Effect of linseed oil microcapsule composite film treatment on the shear stress of frozen chicken

由图4可知,两组鸡肉的剪切力在0~4 d均随时间的延长持续上升,在第4天达到最高,之后开始降低;与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理的冷藏鸡肉剪切力在各时间点均较低,在第4、6、8天时,差异显著( $P<0.05$ )。这表明亚麻油微胶囊复合膜处理能较好地维持冷藏鸡肉的嫩度,其主要原因可能是亚麻油微胶囊复合膜处理控制了鸡肉贮藏期间水分的散失,维持了肉的嫩度。

亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉 pH 值的影响见图5。

由图5可知,两组鸡肉的 pH 值均随时间的延长持续上升;与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理的冷藏鸡肉 pH 值在各时间点均较低,在第6、8天时差异显著( $P<0.05$ )。肉品 pH 值是肉新鲜度的重要反映指标,通常一级新鲜肉的 pH 值为 5.8 至 6.2、二级新鲜肉的 pH 值为 6.3 至 6.6、变质肉的 pH 值大于 6.7<sup>[27]</sup>。在第



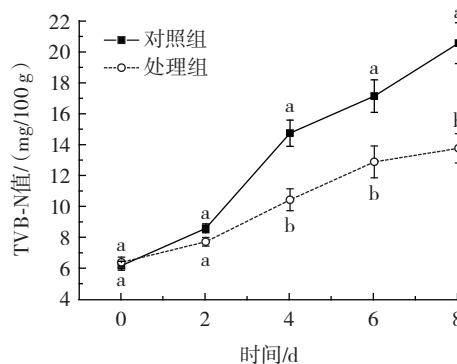
不同字母表示两组不同时间差异显著( $P<0.05$ )。

图5 亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉 pH 值的影响

Fig.5 Effect of linseed oil microcapsule composite film treatment on the pH of frozen chicken

8天,处理组鸡肉的 pH 值为  $6.25\pm 0.18$ ,肉质仍具有较好新鲜度。宰后的鸡肉在贮藏期间,细菌酶使鸡肉蛋白质分解为氨和胺类等碱性物质,导致肉 pH 值升高<sup>[28]</sup>。亚麻油微胶囊复合膜处理降低了细菌酶的活力,抑制肉 pH 值升高。

亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉 TVB-N 值的影响见图6。



不同字母表示两组不同时间差异显著( $P<0.05$ )。

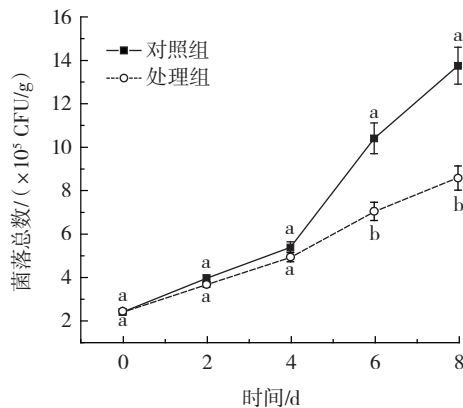
图6 亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉 TVB-N 值的影响

Fig.6 Effect of linseed oil microcapsule composite film treatment on the TVB-N of frozen chicken

由图6可知,两组鸡肉的 TVB-N 值均随时间的延长持续上升;与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理

的冷藏鸡肉 TVB-N 值在各时间点均较低,在第 4、6、8 天时差异显著( $P < 0.05$ )。第 8 天处理组的鸡肉 TVB-N 值为  $(13.76 \pm 0.95)$  mg/100 g, 低于禽产品中挥发性盐基氮值(TVB-N 值)的限量(15 mg/100 g)<sup>[29]</sup>, 表明涂膜能够延缓微生物分解鸡肉蛋白质的速度。在鸡肉自身酶或部分腐败微生物所分泌的胞外酶的作用下,蛋白质降解为氨及胺类物质。本试验中,随着贮藏时间的延长,鸡肉中的蛋白质在酶的作用下发生分解,导致肉中胺类物质的含量增加。亚麻油微胶囊复合膜处理降低了鸡肉中酶与膜外氧气的接触,降低了酶的活力,亚麻酸的抗菌特性使腐败微生物的作用减弱,肉的 TVB-N 值较低。

亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉菌落总数的影响见图 7。



不同字母表示两组不同时间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 7 亚麻油微胶囊复合膜处理对冷藏鸡肉中菌落总数的影响

Fig.7 Effect of linseed oil microcapsule composite film treatment on the total bacterial count of frozen chicken

由图 7 可知,两组鸡肉的菌落总数均随时间的延长持续增加;与对照组相比,亚麻油微胶囊复合膜处理的冷藏鸡肉菌数总数在各时间点均较低,在第 6、8 天时差异显著( $P < 0.05$ )。在第 8 天,处理组鸡肉中菌落总数为  $(8.58 \pm 0.56) \times 10^5$  CFU/g, 鸡肉仍能食用<sup>[30]</sup>。这可能与亚麻酸的抗菌作用有关<sup>[9-11]</sup>。

### 3 结论

采用喷雾干燥包埋法以阿拉伯胶、 $\beta$ -环糊精为壁材制备亚麻油微胶囊。通过研究固形物浓度、阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比、壁材与芯材质量比、搅拌时间、进风温度对亚麻油微胶囊包埋率的影响,设计响应面试验优化微胶囊制备工艺,发现 5 个因素均对微胶囊包埋率有显著影响,在进风温度 179 °C、阿拉伯胶与  $\beta$ -环糊精质量比 6:1、固形物浓度 26%、搅拌时间 36 min、壁材与芯材质量比 5:1 条件下,亚麻油微胶囊包埋率为 97.82%。通过高温贮藏试验,发现经 50 °C 贮藏 15 d 后,被包埋的亚麻油中的主要成分与新鲜油

样品相比没有明显变化,这表明微胶囊包埋亚麻油是有效和实用的工艺技术。另外,冷藏试验表明,亚麻油微胶囊复合液涂膜处理能够较好地维持鸡肉的新鲜品质,这与亚麻油的抗菌和涂膜的屏障作用有关。

### 参考文献:

- [1] XIE D W, DAI Z G, YANG Z M, et al. Genomic variations and association study of agronomic traits in flax[J]. BMC Genomics, 2018, 19(1): 1-12.
- [2] CAMPOS J R, SEVERINO P, FERREIRA C S, et al. Linseed essential oil-source of lipids as active ingredients for pharmaceuticals and nutraceuticals[J]. Current Medicinal Chemistry, 2019, 26(24): 4537-4558.
- [3] DOUNY C, RAZANAKOLONA R, RIBONNET L, et al. Linseed oil presents different patterns of oxidation in real-time and accelerated aging assays[J]. Food Chemistry, 2016, 208: 111-115.
- [4] SKOCZYŃSKA A H, GLUZA E, WOJAKOWSKA A, et al. Linseed oil increases HDL3 cholesterol and decreases blood pressure in patients diagnosed with mild hypercholesterolaemia[J]. Kardiologia Polska, 2018, 76(8): 1242-1250.
- [5] CHILDS C E. Sex hormones and *n*-3 fatty acid metabolism[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2020, 79(2): 219-224.
- [6] NEMETH M, EISENSCHENK I, ENGELMANN A, et al. Flaxseed oil as omega-3 polyunsaturated fatty acid source modulates cortisol concentrations and social dominance in male and female Guinea pigs[J]. Hormones and Behavior, 2021, 134: 105025.
- [7] 张博, 宋玉坤, 努日比娅姆·麦提托合提, 等.  $\alpha$ -亚麻酸通过提高 GSH 水平、降低 ROS 水平促进绵羊卵母细胞抗氧化与氧化平衡能力[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(1): 21-24.  
ZHANG Bo, SONG Yukun, NUZHBIAM Mametitohuti, et al.  $\alpha$ -Linolenic acid can promote the antioxidant and oxidative balance ability of sheep oocytes by increasing GSH level and decreasing ROS level [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2020, 56(1): 21-24.
- [8] 王成强, 徐后国, 梁萌青, 等. 饲料亚麻酸含量对大规格鲈鱼生长性能、抗氧化指标和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(10): 3123-3133.  
WANG Chengqiang, XU Houguo, LIANG Mengqing, et al. Effects of dietary  $\alpha$ -linolenic acid content on growth performance, antioxidant indices and serum biochemical indices of large size Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(10): 3123-3133.
- [9] 邢旭光, 郭国庆, 孙晗笑, 等.  $\gamma$ -亚麻酸的防病抗病作用[J]. 中国公共卫生, 2002, 18(12): 1513-1515.  
XING Xuguang, GUO Guoqing, SUN Hanxiao, et al. Disease prevention and disease resistance of  $\gamma$ -linolenic acid [J]. Chinese Journal of Public Health, 2002, 18(12): 1513-1515.
- [10] 田歆珍, 王贤磊, 孙桂林, 等.  $\gamma$ -亚麻酸的研究进展[J]. 生物技术, 2008, (1): 89-92.  
TIAN Xinzhen, Wang Xianlei, SUN Guilin, et al. Research progress of  $\gamma$ -linolenic acid [J]. Biotechnology, 2008, (1): 89-92.
- [11] 葛海涛, 刘志礼.  $\gamma$ -亚麻酸药理药效研究进展[J]. 中草药, 1999, 30(7): 554-556.  
GE Haitao, LIU Zhili. Research progress on pharmacological effects of  $\gamma$ -linolenic acid [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 1999, 30(7): 554-556.
- [12] ZHANG C X, LI X L, LIU Y N, et al. Utilization of microcapsule technology in foods [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 15(12): 9330-9340.
- [13] NEUBAUER M P, POEHLMANN M, FERY A. Microcapsule me-

- chanics: From stability to function[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, 207: 65-80.
- [14] ARPAGAUS C, COLLENBERG A, RÜTTI D, et al. Nano spray drying for encapsulation of pharmaceuticals[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2018, 546(1-2): 194-214.
- [15] SUN X X, CAMERON R G, MANTHEY J A, et al. Microencapsulation of tangeretin in a *Citrus* pectin mixture matrix[J]. *Foods*, 2020, 9(9): 1200.
- [16] 陈亮, 胡雅宁, 吴志明, 等. 迷迭香叶片干燥前后精油成分 GC-MS 分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(24): 171-176.
- CHEN Liang, HU Yaning, WU Zhiming, et al. GC-MS analysis of essential oil components of rosemary leaves before and after drying [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(24): 171-176.
- [17] PURSLOW P P, GAGAOUA M, WARNER R D. Insights on meat quality from combining traditional studies and proteomics[J]. *Meat Science*, 2021, 174: 108423.
- [18] WENG K Q, HUO W R, GU T T, et al. Effects of marketable ages on meat quality through fiber characteristics in the goose[J]. *Poultry Science*, 2021, 100(2): 728-737.
- [19] SUN F D, WANG H P, LIU Q A, et al. Effects of temperature and pH on the structure of a protease from *Lactobacillus brevis* R4 isolated from Harbin dry sausage and molecular docking of the protease to the meat proteins[J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101099.
- [20] SARJIT A, RAVENSDALE J T, COOREY R, et al. Survival of *Salmonella* on red meat in response to dry heat[J]. *Journal of Food Protection*, 2021, 84(3): 372-380.
- [21] SONG H, CHUNG H, NAM K. Response surface modeling with Box-Behnken design for strontium removal from soil by calcium-based solution[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 274: 116577.
- [22] ALHAJABDALLA M, MAHMOUD H, NASSER M S, et al. Application of response surface methodology and box - behnken design for the optimization of the stability of fibrous dispersion used in drilling and completion operations[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(4): 2513-2525.
- [23] HASHEMI S H, KAYKHAI M, KEIKHA A J, et al. Application of Box-Behnken design in response surface methodology for the molecularly imprinted polymer pipette - tip solid phase extraction of methyl red from seawater samples and its determination by spectrophotometry[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137: 306-314.
- [24] PASANDIDE B, KHODAIYAN F, MOUSAVI Z, et al. Pectin extraction from citron peel: Optimization by Box - Behnken response surface design[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(4): 997-1005.
- [25] 肖香, 王莉莉, 王敏, 等. 真空包装水晶肴肉的贮藏特性研究[J]. *食品与机械*, 2013, 29(1): 187-189, 222.
- XIAO Xiang, WANG Lili, WANG Min, et al. Storage characteristics of vacuum packed jellied meat[J]. *Food & Machinery*, 2013, 29(1): 187-189, 222.
- [26] 邵磊. 鸡脯肉冰温贮藏性能和贮藏品质动力学研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- SHAO Lei. Study on storage performance and storage quality dynamics of chicken breast at ice temperature[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.
- [27] HASHIZAWA Y, KUBOTA M, KADOWAKI M, et al. Effect of dietary vitamin E on broiler meat qualities, color, water-holding capacity and shear force value, under heat stress conditions[J]. *Animal Science Journal*, 2013, 84(11): 732-736.
- [28] 袁先群, 贺雅非, 李洪军, 等. 不同贮藏温度托盘包装冷鲜猪肉的品质变化[J]. *食品科学*, 2012, 33(6): 264-268.
- YUAN Xianqun, HE Zhifei, LI Hongjun, et al. Chilled pork quality change in pallet package at different storage temperatures[J]. *Food Science*, 2012, 33(6): 264-268.
- [29] AFSHAR MEHRABI F, SHARIFI A, AHVAZI M. Effect of chitosan coating containing *Nepeta pogonosperma* extract on shelf life of chicken fillets during chilled storage[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(8): 4517-4528.
- [30] SARJIT A, RAVENSDALE J T, COOREY R, et al. *Salmonella* survival after exposure to heat in a model meat juice system[J]. *Food Microbiology*, 2021, 94: 103628.

加工编辑: 孟琬星  
收稿日期: 2022-08-15