

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.03.016

张抒爱, 郭芳, 周铭懿, 等. 基于响应面法优化壳聚糖-卡拉胶可食性复合膜制备工艺[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 118-124.

ZHANG S A, GUO F, ZHOU M Y, et al. Optimization of preparation process of chitosan-carrageenan edible composite membrane based on response surface methodology[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 118-124.

基于响应面法优化壳聚糖-卡拉胶 可食性复合膜制备工艺

张抒爱, 郭芳, 周铭懿, 李丹丹, 张振, 郭雪松✉

(锦州医科大学, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 将壳聚糖与卡拉胶、茶多酚混合, 采用流延法制备壳聚糖-卡拉胶复合膜, 并对其性能进行测试。以复合膜的透光性能、机械性能和阻水性能为考察指标进行单因素实验, 再以水蒸气透过率为评价指标进行响应面实验优化该复合膜制备工艺。结果表明, 壳聚糖-卡拉胶可食性复合膜的最优工艺为: 壳聚糖添加量 1.5%、卡拉胶添加量 0.4%、甘油添加量 0.6%、茶多酚添加量 0.6%, 干燥温度 50 °C。此工艺条件下所得的复合膜厚度均匀, 机械性能良好, 水蒸气的透过率为 $1.37(10^{-11} \text{ g/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ 。

关键词: 壳聚糖; 卡拉胶; 响应面法; 可食性膜; 优化制备; 机械性能

中图分类号: TS206.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)03-0118-07

Optimization of Preparation Process of Chitosan-carrageenan Edible Composite Membrane Based on Response Surface Methodology

ZHANG Shu-ai, GUO Fang, ZHOU Ming-yi, LI Dan-dan, ZHANG Zhen, GUO Xue-song✉

(Jinzhou Medical University, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract: Chitosan was mixed with carrageenan and tea polyphenols, and chitosan-carrageenan composite film was prepared by the fluidized bed method and its properties were tested. The light transmittance, mechanical property and water resistance of the composite film were investigated by single factor test, and then the response surface experiment was carried out to optimize the preparation process of the composite film with water vapor transmittance as the evaluation index. The results showed that the optimal process of chitosan - carrageenan edible composite film was as follows: adding 1.5% of chitosan, 0.4% of carrageenan, 0.6% of glycerol, 0.6% of tea polyphenols, and drying temperature of 50 °C. Under this condition, the thickness of the composite film was uniform and the mechanical properties were good. The water vapor transmission rate was $1.37(10^{-11} \text{ g/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$.

Key words: chitosan; carrageenan; response surface methodology; edible films; optimized preparation; mechanical properties

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 辽宁省重点研发计划项目(2019010140-JH8/102; 2018225035); 辽宁省自然科学基金项目(20180551037)

Supported by: Key Research and Development Projects of Liaoning Province (No. 2019010140-JH8/102; No.2018225035); Natural Science Fund Projects of Liaoning Province (No. 20180551037)

作者简介: 张抒爱, 女, 1996 年出生, 在读研究生, 研究方向为食品加工与安全。E-mail: Zhangshuaison@163.com.

通讯作者: 郭雪松, 男, 1970 年出生, 硕士, 副教授, 研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: Jzguoxuesong@163.com.

随着人们健康意识逐渐增强,对食品包装安全性的需求及标准也越来越高。与传统的塑料薄膜不同,可食性复合膜的安全性更高,并且具有可生物降解以及可再生性,更加符合绿色环保的发展需求,同时起到阻隔外界物质进入的作用,因此在食品包装领域受到广泛关注^[1-2]。可食性膜是以自然界中可食性材料为主要成膜物质(如壳聚糖、淀粉、卡拉胶等),通过添加含羟基或氨基的化合物(甘油、山梨醇等)为增塑剂制备的薄膜^[3]。研究表明,单一的可食膜存在着一些性能(阻隔性能、机械性能等)不足的问题,影响了膜的应用范围,使其应用受到局限。为了增强膜的综合性能,很多学者将两种及以上的成膜材料共混改性,按照不同的添加量及比例复配,结合不同成膜材料的特性,改善单一成膜材料性能缺陷,从而得到一款具有优良性能的复合膜^[4]。Sánchez-González 等^[5]为了提高膜的综合性能制备了复合膜,罗宁宁^[6]研究了壳聚糖-肉桂精油可食性膜,Wu 等^[7]制备了银鲤皮明胶-牛至精油复合膜,结果表明复合膜的性能均优于单一膜。

卡拉胶(KC)是从海洋红藻中提取的天然多糖,不仅具有优良凝胶性、且无毒无害可食用,同时还具有较好成膜性^[8]。壳聚糖(CS)来源广泛,是天然的碱性氨基多糖,具有一定抑菌功能及良好的生物兼容性,近几年来更因其优良的成膜性,即可以在食品表面形成一层保护膜,被广泛应用于食品的涂膜保鲜^[9]。茶多酚(TP)是从茶叶中提取的多酚物质,具有优良的抗氧化、广谱抑菌性,此外更因其独特的清除异味功能可作为一种天然功能添加剂注入到复合膜液中^[10]。Qin 等^[11]、成淑君等^[12]将 TP 和肉桂精油加入到壳聚糖膜中,所制得的膜具有抑菌性能。钟乐等^[13]利用响应面法优化明胶-壳聚糖可食性复合膜的制备所制膜的透明度、光泽度、及物理性能等表征均为良好。单一壳聚糖膜存在机械性能不足和抗氧化性相对较差的缺点,而茶多酚具有抗氧化性。目前将壳聚糖、卡拉胶与茶多酚复合,研究其性能及制备工艺还未见报道。

本实验将壳聚糖、卡拉胶和茶多酚共混,并加以响应面分析优化,以期制备出适用性更广的可食性复合膜,弥补单一壳聚糖或卡拉胶膜的性能

缺陷,提高膜的综合性能,茶多酚的添加还可增强膜的抑菌性及抗氧化性,为扩大其在食品保鲜等领域的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 实验材料

壳聚糖、丙三醇、无水氯化钙:国药集团化学试剂有限公司;茶多酚、卡拉胶:食品级,沃佳生物科技有限公司;冰醋酸:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司。

1.1.2 主要仪器与设备

质构仪,TMS-PRO 型:北京盈盛恒泰科技有限公司;电子数显测厚规,SYNTEK-59 防油型:浙江德清公司;紫外可见分光光度计,752N 型:上海仪电分析仪器有限公司;超声波清洗器,CJ-040 型:深圳市超洁科技实业有限公司;电热鼓风干燥箱,DHG-9030A 型:上海一恒仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 壳聚糖-卡拉胶复合膜制备工艺流程

称取一定量的壳聚糖溶解于 1%冰醋酸溶液中+一定量的卡拉胶和茶多酚→搅拌加入甘油→40 °C 磁力搅拌 1 h 直至溶液完全溶解→超声脱气 1 h 直至气泡消除→静置冷却至室温→取一定量的膜液倒入一次性培养皿中流延成膜(25 mL)→50 °C 干燥 6 h→接膜→恒温恒湿培养箱平衡 12 h→贮存待测。

1.2.2 单因素实验设计

1.2.2.1 壳聚糖不同添加量对壳聚糖-卡拉胶复合膜性能的影响 固定卡拉胶添加量 0.6 g、茶多酚 0.6 g、甘油 0.6 g,改变壳聚糖添加量(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%),按 1.2.1 制膜工艺制备复合膜,并测定其性能。

1.2.2.2 卡拉胶不同添加量对壳聚糖-卡拉胶复合膜性能的影响 固定壳聚糖添加量 1.5 g、茶多酚 0.6 g、甘油 0.6 g,改变卡拉胶添加量(0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%),按 1.2.1 制膜工艺制备复合膜,并测定其性能。

1.2.2.3 甘油不同添加量对壳聚糖-卡拉胶复合膜性能的影响 固定壳聚糖添加量 1.5 g、卡拉胶

0.6 g、茶多酚添加量 0.6 g，改变甘油添加量（0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%），按 1.2.1 制膜工艺制备复合膜，并测定其性能。

1.2.3 响应面法优化

根据单因素实验结果，利用 Design-Expert 软件，按照 Box-Behnken 实验设计，以壳聚糖、卡拉胶、甘油添加量为考察因子，水蒸气透过率为考察指标，制定 3 因素 3 水平的响应面实验，每个实验做三个平行，测定各个指标并进行工艺优化。因素水平表为表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of Box-Benlmke %

因素	因素		
	-1	0	1
A 壳聚糖	1.0	1.5	2.0
B 卡拉胶	0.2	0.4	0.6
C 甘油	0.4	0.6	0.8

1.2.4 复合膜的性能测试

1.2.4.1 膜厚度测试 参考 GB/T 6672—2001 《塑料薄膜与薄片厚度的测定机械测量法》^[14]。用电子数显测厚规在表面光滑的膜上选取七个（中心一个点周围六个点）测试点取平均值，记为 D。（测量精度为 0.001 mm）

1.2.4.2 膜不透明度测试 参照 SHOJAEE-ALIABADI 等^[15]方法并略加修改，将薄膜剪切成 1 cm × 4.5 cm 的长条形，放入烘干箱干燥后取出，将其固定在比色皿内壁。用空气比色皿作为空白对照组，在 660 nm 波长下用分光光度计测定吸光值。每个样品测 3 个平行，取平均值。按公式（1）计算不透明度。

$$\text{不透明度} = A_{660}/D \quad (1)$$

式中：A₆₆₀—波长 660 nm 下吸光值；D—薄膜厚度，mm。

1.2.4.3 膜水蒸气透过率（WVP）测试 参照 Kurt A 等^[16]的拟杯式法并加以适当修改。将无水氯化钙研磨，放入烘干箱干燥至恒重，取出冷却至室温备用（相对湿度 0%）。在玻璃干燥器底部加入蒸馏水（维持相对湿度为 100%），将待测膜密封覆盖在装满氯化钙的小三角瓶（25 mL）瓶口，称重后将其置于事先准备好的干燥器中，然后移入 25 °C 的气候培养箱中，每隔 6 h 将三角瓶取出

称重，连续测 4 次（精准到 0.000 1）。按公式（2）计算水蒸气透过率（WVP）。

$$WVP = (m \times D) / (t \times A \times \Delta P) \quad (2)$$

式中：m—三角瓶增加重量，g；t—时间，s；A—薄膜透水有效面积，m²；D—薄膜厚度，m；ΔP—薄膜两侧水蒸气压力差，（25 °C，3 169 Pa）。

1.2.4.4 膜机械性能测试 参考 ASTM D882 标准并稍作修改。将膜裁成 5 cm × 1.5 cm 的长条形，在 TMS-Pro 质构仪上选择薄膜拉伸试验程序进行测定，设定参数：起始夹距为 20 mm，拉伸速率为 60 mm/min，每组样品测量 6 条，最终结果取其平均值。按公式（3）、（4）计算拉伸强度（TS）和断裂伸长率（EB）

$$TS = F_{\max}/A \quad (3)$$

式中：F_{max}—样品断裂时的力，N；A—膜的横截面积（膜厚度乘以膜宽度），mm²。

$$EB = (L - L_0/L_0) \times 100\% \quad (4)$$

式中：L—样品断裂时的长度，m；L₀—样品的初始长度，m。

1.3 数据处理

作图和数据分析分别采用 Excel 和 SPSS 19.0，显著性（P < 0.05），响应面实验设计及数据分析采用软件 Design-Expert 8.0.6。

2 结果与分析

预实验结果显示，随着茶多酚添加量（0.2%~1.0%）的增加，水蒸气透过率先降低再增大，制备的复合膜颜色逐渐加深，由浅黄色变为深黄色，b*值由 10.25 增加到 21.44（b*代表黄蓝程度），ΔE 由 5.69 增加到 14.37。同时，当茶多酚添加量达到 0.6%时，膜的拉升强度降低，综合考虑复合膜的感官品质及其性能，本实验确定茶多酚的添加量为 0.6%。

2.1 壳聚糖添加量对复合膜性能的影响

由表 2 可知，随着壳聚糖含量的增加，膜的厚度逐渐升高，壳聚糖添加量为 0.5%时，膜的厚度只有 0.033 mm 左右，此时膜软且不易接膜。复合膜的不透明度逐渐降低，不透明度的值越小表示膜的透光性越好。膜的断裂伸长率也逐渐降低，这可能是因单一壳聚糖膜质脆，壳聚糖添加量越多越偏向壳聚糖膜的性质。水蒸气透过率和拉升

表 2 壳聚糖添加量对复合膜性能影响

Table 2 Effect of chitosan addition on properties of composite membrane

壳聚糖添加量/%	厚度/mm	不透明度	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	水蒸气透过率/(10 ⁻¹¹ g/m·s·Pa)
0.5	0.033±0.012	1.45±0.05	15.21±0.04	78.21±0.32	1.34±0.02
1.0	0.045±0.008	1.18±0.01	21.22±0.33	61.34±0.08	1.50±0.04
1.5	0.072±0.007	0.75±0.04	25.03±0.42	53.86±0.10	1.68±0.03
2.0	0.083±0.010	0.75±0.05	31.22±0.45	41.51±0.12	2.71±0.01
2.5	0.089±0.009	0.52±0.07	30.92±0.13	43.67±0.06	2.90±0.01

强度都逐渐升高,可能是因为壳聚糖本身是亲水物质还会与其他分子形成氢键,互相产生作用力^[17]。当壳聚糖添加量为 2.0%时拉升强度达到最大,但是水蒸气透过率达到 2.71。故综合考虑,壳聚糖添加量选择 1.5%。

2.2 卡拉胶添加量对复合膜性能的影响

由表 3 可知,卡拉胶的添加量会影响膜的性能变化。随着卡拉胶含量的添加,会使膜的透光性越来越好,膜的厚度、拉升强度和水蒸气透过率都是呈递增趋势,且当卡拉胶添加量为 0.8%时,三个指标都达到最大值。这是因为卡拉胶是天然高分子,含有很多羟基,它的加入会提高氢键之间的相互作用力,增强分子间相互作用。当添加量为 1%时,拉升强度略微降低,可能是分子间的氢键作用受到一定影响,从而致使膜拉升强度减小。且卡拉胶添加量过多的成膜液会比较粘稠,使其流动性减小,不利于自然流动成膜。因此,综合考虑,选择卡拉胶添加量 0.4%。

2.3 甘油添加量对复合膜性能的影响

由表 4 可知,当甘油添加量为 1.0%时,膜的厚度达到所有组合的最大值 0.120 mm。随着甘油添加量的增加,膜的不透明度逐渐降低,说明甘油的加入会增加分子间的空隙使膜厚度增大,透光率增大。膜的断裂伸长率和水蒸气透过率也随之逐渐增大,这是由于甘油本身为亲水物质,且相对分子质量较小,很容易进入分子内部与多糖形成新的网络,从而使分子之间的相互作用力减弱,进一步使分子链的流动性及其自由体积得以增大,水分扩散的能力和柔韧性得到增强^[18]。水蒸气透过率是衡量膜阻水性能的参考指标,其值越小表示阻水性能越好,综合考虑,选择甘油添加量 0.6%。

2.4 响应面实验结果与分析

2.4.1 响应面回归方程建立与分析

采用软件对表 5 实验结果分析得到 $WVP=1.38-0.051A-0.049B-0.057C+0.080AB+0.13AC+0.19BC+$

表 3 卡拉胶添加量对复合膜性能影响

Table 3 Effect of carrageenan addition on properties of composite membrane

卡拉胶添加量/%	厚度/mm	不透明度	拉伸强/MPa	断裂伸长率/%	水蒸气透过率/(10 ⁻¹¹ g/m·s·Pa)
0.2	0.034±0.08	1.37±0.06	26.45±0.84	60.59±0.26	0.88±0.03
0.4	0.050±0.11	1.23±0.01	30.87±0.79	41.88±0.08	1.32±0.07
0.6	0.061±0.05	1.15±0.02	34.56±0.04	36.52±0.15	1.78±0.01
0.8	0.066±0.04	0.96±0.05	36.53±0.02	33.81±0.22	1.54±0.02
1.0	0.063±0.13	1.12±0.08	35.53±0.07	37.19±0.14	1.37±0.03

表 4 甘油添加量对复合膜性能影响

Table 4 Effect of glycerol addition on properties of composite membrane

甘油添加量/%	厚度/mm	不透明度	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	水蒸气透过率/(10 ⁻¹¹ g/m·s·Pa)
0.2	0.058±0.11	1.88±0.04	32.45±0.84	40.16±0.21	1.21±0.01
0.4	0.062±0.06	1.53±0.04	30.53±0.79	42.99±0.08	1.42±0.07
0.6	0.077±0.04	0.94±0.05	28.56±0.04	51.36±0.24	1.75±0.04
0.8	0.091±0.12	0.82±0.03	25.43±0.02	64.57±0.45	2.14±0.02
1.0	0.120±0.09	0.72±0.02	20.16±0.07	69.71±0.06	2.59±0.07

$0.27A^2+0.23B^2+0.30C^2$ 的二次多元回归方程, 和表 6 方差分析结果。由表 6 可知, 该模型 $P<0.0001$, 达到极显著水平, 失拟 $P=0.7003>0.05$, 不显著, 说明模拟效果良好。且相关系数 R^2 为 0.9878, R^2_{Adj} 为 0.9720, 说明此模型可以解释 97.20% 的响应值变化, 方程拟合度较好。可以用来对壳聚糖-卡拉胶复合膜进行优化分析和预测。且影响因素 C (甘油添加量) $>A$ (壳聚糖添加量) $>B$ (卡拉胶添加量)。

表 5 Box-Behnken 实验设计与结果
Table 5 Box-Behnken experiment design and corresponding results

实验号	壳聚糖添加量/%	卡拉胶添加量/%	甘油添加量/%	水蒸气透过率/(g·m ⁻¹ ·s·Pa)
1	1.5	0.2	0.4	2.21
2	1.0	0.4	0.8	1.84
3	1.0	0.6	0.6	1.77
4	1.5	0.4	0.6	1.34
5	1.5	0.4	0.6	1.39
6	2.0	0.6	0.6	1.87
7	1.5	0.6	0.8	1.98
8	1.0	0.4	0.4	2.19
9	2.0	0.4	0.8	1.95
10	1.5	0.4	0.6	1.46
11	1.5	0.6	0.4	1.73
12	1.5	0.2	0.8	1.69
13	1.5	0.4	0.6	1.32
14	2.0	0.4	0.4	1.79
15	1.0	0.2	0.6	2.03
16	1.5	0.4	0.6	1.37
17	2.0	0.2	0.6	1.81

表 6 回归模型方差分析

Table 6 ANOVA for response surface quadratic model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1.3	9	0.14	62.80	< 0.0001	**
A	0.021	1	0.021	9.11	0.0194	*
B	0.019	1	0.019	8.24	0.0240	*
C	0.026	1	0.026	11.47	0.0117	*
AB	0.026	1	0.026	11.10	0.0126	*
AC	0.065	1	0.065	28.19	0.0011	**
BC	0.15	1	0.15	64.27	< 0.0001	**
A ²	0.30	1	0.30	130.14	< 0.0001	**
B ²	0.22	1	0.22	94.07	< 0.0001	**
C ²	0.38	1	0.38	163.75	< 0.0001	**
残差	0.016	7	0.00023			
失拟项	0.00045	3	0.00015	0.50	0.7003	
纯误差	0.012	4	0.003			
总和	1.32	16				

注: **表示差异极显著 ($P<0.01$), *表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.4.2 响应曲面与等高线分析

在甘油添加量为 0.6% 时, 壳聚糖添加量与卡拉胶添加量对水蒸气透过率的交互作用如图 1, 随着壳聚糖和卡拉胶添加量增加, 水蒸气透过率先降低后上升。在卡拉胶添加量为 0.4% 时, 壳聚糖添加量和甘油添加量对水蒸气透过率的交互作用如图 2。随着壳聚糖和甘油添加量的增加, 响应面趋势先降低后上升。在壳聚糖添加量为 1.5% 时, 卡拉胶和甘油添加量对水蒸气的交互作用如图 3, 增加卡拉胶和甘油添加量, 水蒸气透过率达到最低后又上升。图 1(b)、图 2(b)、图 3(b) 的等高线轮廓都比较接近图椭圆, 表明它们之间对水蒸气的透过率有交互影响。且甘油和卡拉胶添

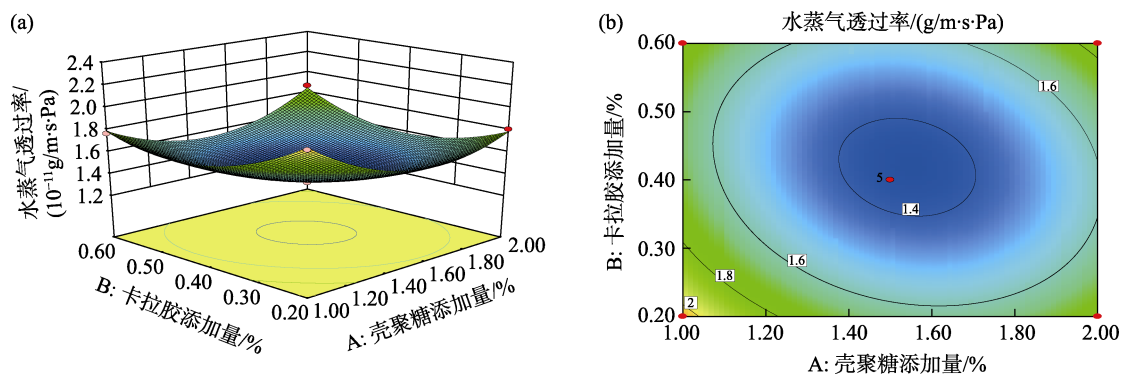


图 1 壳聚糖添加量、卡拉胶添加量对水蒸气透过率的影响

Fig.1 Effects of chitosan and carrageenan on water vapor transmission

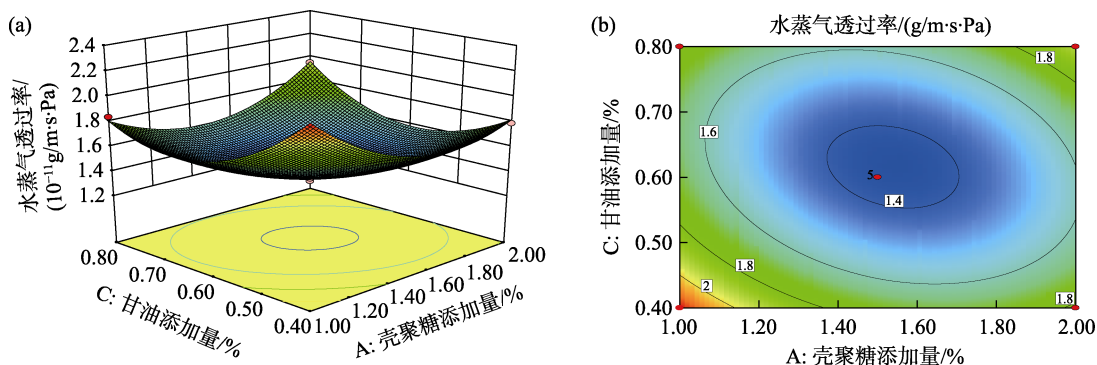


图 2 壳聚糖添加量、甘油添加量对水蒸气透过率的影响
Fig.2 Effects of and glycerol on water vapor transmission

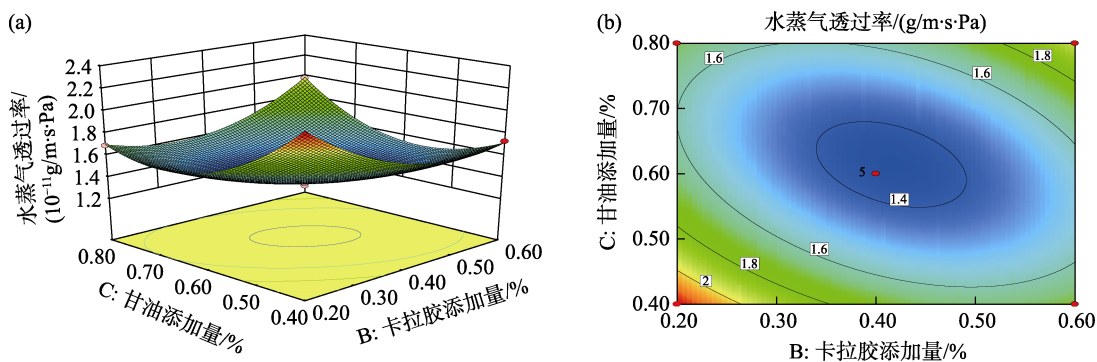


图 3 卡拉胶添加量、甘油添加量对水蒸气透过率的影响
Fig.3 Effects of carrageenan and glycerol on water vapor transmission

加量的相互作用对水蒸气透过率的影响更显著。

2.4.3 最优工艺参数确定及验证

通过 Design-Expert 8.0.6.1 软件进行分析与优化，确定最佳配比为壳聚糖 1.5%、卡拉胶 0.4%、甘油 0.6%（为方便制备已取整数）。在此工艺下三次重复实验，测定复合膜的水蒸气透过率，测定的平均值为 $1.38 (10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。接近预测值 $1.37 (10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ，表明该模型可靠。同时，此时的复合膜的厚度为 0.050 mm，拉伸强度为 31.21 MPa，断裂伸长率为 41.34%，对比单一壳聚糖膜的厚度略有提升，机械和阻水等综合性能得到提高，说明该模型能优化成膜工艺。

3 结论

本实验将壳聚糖与卡拉胶、茶多酚混合，采用流延法制备壳聚糖-卡拉胶复合膜。通过响应面实验优化了最佳成膜工艺，最佳工艺为壳聚糖 1.5%、卡拉胶 0.4%、甘油 0.6%、茶多酚 0.6%，此时的可食性复合膜的综合性能得到改善，机械性能和阻水性能都优于单一壳聚糖膜，弥补了单

一壳聚糖膜质脆和阻水性能差的缺点，且满足绿色环保的需求，为其在食品保鲜及其他领域应用提供理论依据。后续可从该复合膜的抗氧化性及抑菌性入手，研究其在食品涂膜保鲜对食品品质变化的影响。

参考文献:

- [1] 蒋春啟, 周然. 可食性包装膜及其制备工艺优化研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(21): 19-23.
JIANG C Q, ZHOU R. Study on edible packaging film and its preparation process optimization[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(21): 19-23.
- [2] 王君, 乔翼娇, 胡文. 可食性壳聚糖膜的制备及功能特性研究[J]. 包装与食品机械, 2019, 37(4): 15-18.
WANG J, QIAO Y J, HU W. Preparation and functional properties of edible chitosan membrane[J]. Packaging and food machinery, 2019, 37(4): 15-18.
- [3] 张赞彬, 江娟. 可食膜的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2011(1): 191-198.
ZHANG Z B, JIANG J. Research progress of edible film[J]. Food additives in China, 2011(1): 191-198.
- [4] XIE J, LI J, LIANG J, et al. Determination of contents of

- catechins in oolong teas by quantitative analysis of multi-components via a single marker(QAMS) method[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10(2): 363-368.
- [5] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ L, CHÁFER M. Physical properties of edible chitosan films containing bergamot essential oil and their inhibitory action on *Penicillium italicum*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 82(2): 277-283.
- [6] 罗宁宁. 壳聚糖-肉桂精油可食性膜的制备、性能及应用研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2016.
LUO N N. Preparation, properties and application of chitosan cinnamon essential oil edible film[D]. SHANGHAI: Shanghai Institute of Applied Technology, 2016.
- [7] AVILA-SOSA W, LÓPEZ-MALO A. Fungal inactivation by mexican oregano essential oil added to amaranth, chitosan, or starch edible films[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 75(3).
- [8] 颜田田, 戚勃, 杨贤庆, 等. 增塑剂对卡拉胶可食用膜性能的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(23): 97-102.
YAN T T, QI B, YANG X Q, et al. Effect of plasticizer on properties of carrageenan edible film[J]. *Food and fermentation industry*, 2019, 23: 97-102.
- [9] 张振. 壳聚糖-ε-聚赖氨酸-卡拉胶复合涂膜对冷藏中国对虾品质影响研究[D]. 辽宁: 沈阳农业大学, 2020.
ZHANG Z. Effect of chitosan-ε-polylysine-carrageenan composite coating on the quality of *Penaeus chinensis* during cold storage [D]. LIAONING: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [10] 龚易昕悦, 周银颖, 文建英, 等. 茶多酚与壳聚糖的复配在食品保鲜中的应用研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2020, 3(217): 221-225.
GONG Y X Y, ZHOU Y Y, WEN J Y, et al. Application of tea polyphenols and chitosan in food preservation[J]. *Storage and Process*, 2020, 3(217): 221-225.
- [11] QIN Y Y, YANG J Y, LU H B. Effect of chitosan film incorporated with tea polyphenol on quality and shelflife of pork meat[J]. *pattieInternational Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 61(10): 312-316.
- [12] 成淑君, 李秋铮, 曾瑶英, 等. 肉桂精油抗菌膜的制备及应用[J]. *食品工业*, 2020, 41(6): 19-23.
CHENG S J, LI J Q, ZENG Y Y, et al. Preparation and application of cinnamon essential oil antibacterial film[J]. *food industry*, 2020, 41(6): 19-23.
- [13] 钟乐, 肖乃玉, 翟万京, 等. 响应面优化明胶-壳聚糖可食性复合膜的制备[J]. *包装工程*, 2017, 19(38): 98-103.
ZHONG L, XIAO N Y, ZHAI W J, et al. Preparation of gelatin chitosan edible composite films optimized by response surface methodology[J]. *Packaging engineering*, 2017, 19(38): 98-103.
- [14] 塑料薄膜拉伸性能试验方法: GB 13022—91[S].
Test method for tensile properties of plastic film: GB 13022—91[S].
- [15] SUKHIJA S, SINGH S, RIAR C S. Analyzing the effect of whey protein concentrate and psyllium husk on various characteristics of biodegradable film from lotus (*Nelumbonucifera*) rhizomestarch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 128-137.
- [16] KURTA, KAHYA OGLUT. Characterization a new biodegradable edible film made from salep glucomannan[J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 104: 50-58.
- [17] 卢俊宇, 朱芮, 吴贺君, 等. 茶多酚对可食性马铃薯淀粉/海藻酸钠复合膜性能影响及表征[J]. *核农学报*, 2020, 34(10): 2226-2234.
LU J Y, ZHU R, WU H J, et al. Effect and characterization of tea polyphenols on the properties of edible potato starch/sodium alginate composite membrane[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2020, 34(10): 2226-2234.
- [18] GHASEMLOU M, KHODAIYAN F, OR OMIEHIE A P. Hysical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable ediblefilm made form kefiran[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 84(1): 447-483. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。