

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90089

# 玉米胚芽粕制备蛋白膜工艺优化及抗氧化研究

Optimization and antioxidant study of protein film  
prepared from corn germ pulp

张金凤 王艳文 范恒军 张宇婷

ZHANG Jin-feng WANG Yan-wen FAN Heng-jun ZHANG Yu-ting

(绥化学院食品与制药工程学院, 黑龙江 绥化 152061)

(The Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Suihua College, Suihua, Heilongjiang 152061, China)

**摘要:**目的:利用玉米胚芽粕中的醇溶蛋白制备玉米醇溶蛋白膜,减少塑料膜对环境的污染。方法:以玉米胚芽粕为原料,通过碱溶酸沉从玉米胚芽粕中提取得到玉米醇溶蛋白,加入一定量的乙醇溶液再利用超声波辅助法加入适量的增塑剂和还原剂,在一定的水浴温度下水浴 30 min,待膜液室温后,膜液流延成玉米醇溶蛋白膜。探究丙三醇添加量、超声时间、乙醇体积分数以及水浴温度 4 个因素对玉米醇溶蛋白膜的水溶性、水蒸气透过率、CO<sub>2</sub>透过率的影响,得出最佳制备工艺,并通过将成膜液涂布在梨切片表面进行抗氧化保鲜试验,同时做涂膜空白对照,观察相同时间内梨切片表面的褐变程度。结果:通过正交试验,得到最优制膜工艺为丙三醇添加量 0.3 g/g 醇溶蛋白、超声时间 5 min、乙醇体积分数 80%、水浴温度 70 °C。在此条件下,玉米醇溶蛋白膜水溶性为 19.75%、水蒸气透过率为 6.13 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa)、CO<sub>2</sub>透过率为 0.21 g/(m<sup>2</sup>·h),玉米胚芽粕制备蛋白膜液能够使梨切片的褐变速度明显降低。结论:玉米胚芽粕制备蛋白膜可行,膜液能够在果蔬保鲜上起到很好的抗氧化效果。

**关键词:**玉米胚芽粕;玉米蛋白;蛋白膜;抗氧化

**Abstract: Objective:** This study aimed to prepare a zein film from the gliadin in corn-germ pulp and study its process, performance and antioxidant properties. **Methods:** The corn-germ pulp was used as raw material, and zein was extracted from corn germ pulp by alkali-soluble acid precipitation. A certain amount of ethanol solution was added, and then an appropriate amount of plasticizer and reducing agent was added by using the ultrasonic assist meth-

od. After the membrane solution was in a water-bath at room temperature for 30 minutes, the membrane solution was cast into a zein membrane. The influence of the four factors of glycerol addition, ultrasonic time, ethanol concentration and water bath temperature on the water solubility, water vapor transmission rate, and CO<sub>2</sub> transmission rate of the zein film were explored, and the best preparation process was obtained. By coating the film-forming liquid on the surface of the pear slices, the anti-oxidation preservation test was performed, and the blank control of the coating film was used to observe the degree of browning on the surface of the pear slices. **Results:** Through orthogonal experiments, the optimal membrane preparation process was obtained as follows: glycerin addition of 0.3 g/g gliadin, ultrasound time of 5 min, ethanol concentration of 80%, and water bath temperature of 70 °C. Under the control of these conditions, the water solubility of the zein membrane was 19.75%, with the WVP of 6.13 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa), and the CO<sub>2</sub> permeability was 0.21 g/(m<sup>2</sup>·h). The preparation of protein film liquid from corn germ pulp could significantly reduce the browning speed of pear slices. **Conclusion:** It is feasible to prepare protein film from corn germ pulp, and the film liquid can play a good antioxidant effect on the preservation of fruits and vegetables.

**Keywords:** corn germ pulp; zein; protein film; antioxidant

玉米胚芽粕中含粗蛋白质 18%~20%,粗脂肪 1%~2%,粗纤维 11%~12%。其氨基酸组成与玉米蛋白饲料(或称玉米麸质饲料)相似,属于饼粕类。因为玉米胚芽粕中的玉米蛋白很容易被提取出来,并且损失率极低。玉米胚芽粕中的蛋白质的利用及研究已成为国内外学者研究的方向和课题。玉米醇溶蛋白是由肽链主链上的羟基和亚氨基之间的氢键形成的蛋白质混合物,富含含硫氨基酸,蛋白质分子间通过强二硫键和水分散键连接,具有良好的成膜性能。作为一种可再生的天然高分子蛋白,玉米醇溶蛋白具有生物降解性和生物相容性。它一

**基金项目:**黑龙江省省属高等学校基本科研业务费青年项目(编号:KYYWF10236190108);黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(编号:202110236006)

**作者简介:**张金凤(1989—),女,绥化学院讲师,硕士。

E-mail: zhangfeng\_1105@126.com

**收稿日期:**2021-11-05

方面可以单独用作保鲜膜,另一方面也可以用作涂膜液,对果蔬的保鲜起到重要作用<sup>[1]</sup>。

目前,国内外对玉米醇溶蛋白膜的研究有很多:包括张雪娜等<sup>[2]</sup>利用超声波萃取玉米蛋白粉中的玉米醇溶蛋白,再制备玉米醇溶蛋白膜并测定其机械性能;刘婷婷等<sup>[3]</sup>利用超声波和微波制备了玉米醇溶蛋白-壳聚糖复合膜,得到了最佳工艺条件为超声功率 180 W,微波温度 50 °C,协同作用时间 6 min,搅拌速度 300 r/min,制备的薄膜表面光滑,颗粒少;贾祥祥<sup>[4]</sup>以玉米醇溶蛋白为原料制备了蛋白质膜,通过单因素试验得到工艺条件再测性能指标;在此基础上作响应面试验得最佳工艺;曹思远等<sup>[5]</sup>以玉米醇溶蛋白为主要原料,以一定体积分数的乙醇为溶剂,甘油和油酸为增塑剂,研究了增塑剂用量、制备温度和挤出压力对玉米醇溶蛋白膜强度的影响;崔和平等<sup>[6]</sup>以玉米醇溶蛋白膜为原料制备蛋白质膜,加增塑剂和还原剂,通过单因素试验采取响应面优化得最佳工艺,以提高玉米醇溶蛋白膜的水溶性。

从前人研究现状可知,玉米醇溶蛋白膜原来仅限于玉米淀粉或者玉米蛋白粉,目前尚未有学者研究从玉米制油副产物玉米胚芽粕原料中提玉米醇溶蛋白制备蛋白膜。研究拟从玉米胚芽粉粕中提取玉米醇溶蛋白,加入一定量的增塑剂、还原剂改善玉米蛋白膜的性能不稳定性,深度加工形成质地均匀的、可降解的玉米醇溶蛋白膜,以期制备一种环保无污染可食用性包装膜。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

玉米胚芽粕:河北石家庄华仁饲料有限公司;

皇冠梨:市售;

正己烷、亚硫酸钠、盐酸、无水乙醇、无水亚硫酸钠、丙三醇、氢氧化钾、无水氯化钙:分析纯,天津市光复科技发展有限公司;

离心机:80-2B型,湖南星科科学仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-6型,江苏省金坛市荣华仪器制造有限公司;

电子分析天平:XS 365M型,上海衡平仪器表厂;

万能粉碎机:FW100型,天津市泰斯特仪器有限公司;

超声波仪:KQ-50B型,昆山市超声仪器有限公司;

pH计:PHS-25(数显)型,上海精密科学仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 玉米胚芽粕提取玉米胚芽蛋白工艺 借鉴许英一等<sup>[7]</sup>玉米胚芽蛋白提取工艺的优化,将新鲜玉米胚芽粕经高速万能粉碎机粉碎后,室温下按  $m_{\text{玉米胚芽粕}}:V_{\text{正己烷}}=1:2$  (g/mL)的比例加正己烷脱脂过夜,蒸发溶剂备用。

脱脂玉米胚芽粉用崔立平<sup>[8]</sup>研究确定的 200 目为最佳破碎程度的检验过筛目数,用 1 mol/L 的 NaOH 溶液[料液比为 1:14 (g/mL)、pH 调为 9.5]在恒温水浴锅 60 °C 的水温下加热 60 min,冷却至室温,4 000 r/min 离心 20 min,离心后取上层清液,在其加入 1 mol/L 的 HCl 溶液(pH 调为 4.2)在恒温水浴锅 60 °C 的水温下加热 30 min,冷却至室温,4 000 r/min 离心 30 min,取沉淀,制得玉米蛋白,用考马斯亮蓝测定蛋白含量。

1.2.2 玉米醇溶蛋白膜的制备 取一定量的玉米蛋白溶于一定体积分数的乙醇溶液中,再加入一定比例的增塑剂和还原剂。在功率 180 W,时间 5 min 超声辅助溶解,60 °C 恒温水浴反应 30 min 得到蛋白膜溶液<sup>[2-3]</sup>。取 75 mL 的成膜液,倒入玻璃板中流延,自然晾干接膜保存在相对潮湿的环境中等待后续试验备用。

### 1.2.3 膜性能的测定

(1) CO<sub>2</sub>透过率:在含有 5 mL 蒸馏水的试管中加入氢氧化钾直至饱和。用所制得的蛋白膜覆盖试管口处,用皮筋扎紧称重后置于空气中,每天称重两次,连续称 5 d,以增加的重量计算二氧化碳透过率<sup>[9]</sup>。按式(1)计算 CO<sub>2</sub>透过率。

$$P_{\text{CO}_2} = \Delta m / (A \times T), \quad (1)$$

式中:

$P_{\text{CO}_2}$ ——二氧化碳透过速率,g/(m<sup>2</sup>·h);

$\Delta m$ ——锥形瓶的增加量,g;

$A$ ——膜的面积,m<sup>2</sup>;

$T$ ——测定时间间隔,h。

(2) 水溶性:根据文献[10]并修改,将蛋白质膜在 75 °C 的干燥箱中干燥至恒重,准确称重后,放入装有 50 mL 蒸馏水的锥形瓶中,并将瓶口密封,防止灰尘进入和水蒸发。室温溶解 3 h,将倒干水后的薄膜在 105 °C 干燥至恒重,称重。根据蛋白质膜溶解前后的重量变化计算其水溶性。按式(2)计算水溶性。

$$w = (m_1 - m_2) / m_1 \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$w$ ——水溶性,%;

$m_1$ ——溶解前样品的质量,g;

$m_2$ ——溶解后样品的质量,g。

(3) 水蒸气透过率:参照李磊等<sup>[11]</sup>的拟杯子法。将取下来的薄膜密封在装有 4 g 无水氯化钙的锥形瓶中(需称量至恒重),并将锥形瓶放置于(90±2)%相对湿度和(25±2) °C 温度下,定时从干燥器中取出并测量增重。按式(3)计算水蒸气透过率。

$$T = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$T$ ——水蒸气透过率,%;

$W_1$ ——未吸水时小锥形瓶的初始重量,g;

$W_2$ ——定时吸水后小锥形瓶的重量, g。

#### 1.2.4 不同因素对玉米醇溶蛋白成膜的影响

(1) 丙三醇添加量对玉米醇溶蛋白膜性能的影响: 分别准确称取 6 g 玉米蛋白, 按  $m_{\text{玉米蛋白}} : V_{\text{正己烷}} = 1.0 : 6.5$  (g/mL) 加入体积分数 70% 的乙醇, 在超声波功率为 180 W 下, 超声 6 min 后加入质量分数分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 g/g 醇溶蛋白的甘油(丙三醇)和 0.2 g 的无水亚硫酸钠, 研究丙三醇添加量对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响。

(2) 乙醇体积分数对玉米醇溶蛋白膜性能的影响: 分别准确称取 6 g 玉米蛋白, 按  $m_{\text{玉米蛋白}} : V_{\text{正己烷}} = 1.0 : 6.5$  (g/mL) 加入乙醇体积分数分别为 70%, 75%, 80%, 85%, 90% 的乙醇, 在超声波功率为 180 W 下, 超声 6 min 后加入 0.3 g/g 醇溶蛋白的甘油(丙三醇)和 0.2 g 的无水亚硫酸钠, 研究乙醇体积分数对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响。

(3) 超声时间对玉米醇溶蛋白膜性能的影响: 分别准确称取 6 g 玉米蛋白, 按  $m_{\text{玉米蛋白}} : V_{\text{正己烷}} = 1.0 : 6.5$  (g/mL) 加入体积分数为 70% 的乙醇, 在超声波清洗机功率为 180 W 下, 分别超声 4~8 min 后加入 0.3 g/g 醇溶蛋白的甘油(丙三醇)和 0.2 g 的无水亚硫酸钠, 研究超声时间对玉米胚芽粕蛋白膜性能的影响。

(4) 水浴温度对玉米醇溶蛋白膜性能的影响: 分别准确称取 6 g 玉米蛋白, 按  $m_{\text{玉米蛋白}} : V_{\text{正己烷}} = 1.0 : 6.5$  (g/mL) 加入体积分数为 70% 的乙醇, 在超声波清洗机功率为 180 W 下, 超声 6 min 后加入 0.3 g/g 醇溶蛋白的甘油(丙三醇)和 0.2 g 的无水亚硫酸钠, 在恒温水浴锅水温分别为 40, 50, 60, 70, 80 °C 下恒温水浴反应 30 min, 研究水浴温度对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响。

1.2.5 正交试验优化制膜条件 根据单因素试验结果, 设计四因素三水平的正交试验进一步优化, 得到最优的组合。

1.2.6 抗氧化活性研究 以褐变指数反映抗氧化活性。选用新鲜的市售皇冠梨, 梨表面光滑、无伤痕/黑色斑点, 把梨切成切片, 按最优结果制备玉米胚芽粕醇溶蛋白膜液, 成膜液立即涂抹在新鲜、无褐变、无霉变的切片上, 室温平放放置 6 h, 每隔 1 h 观察梨切片的褐变情况进行褐变指数测定, 同时做涂膜空白对照试验。

褐变指数是由 8 名经验丰富的感官评价人员采用观察法评价和计算。褐变程度分为 6 个等级, 分别以数字 0、1、2、3、4、5 来表示<sup>[12]</sup>, 见表 1。按式(4)计算每个样品的褐变指数。

$$I_B = \sum(P_B \times S_N) / T_{NP}, \quad (4)$$

式中:

$I_B$ ——褐变指数;

$P_B$ ——褐变级数;

表 1 褐变程度对照表

Table 1 Comparison table of degree of browning

等级	褐变程度
0 级	完全未褐变
1 级	有褐变点
2 级	轻微褐变, 褐变面积 < 1/5
3 级	中等褐变, 1/5 < 褐变面积 < 1/3
4 级	严重褐变, 1/3 < 褐变面积 < 1/2
5 级	完全褐变, 褐变面积 > 1/2

$S_N$ ——该级片数;

$T_{NP}$ ——总片数。

## 2 结果与分析

### 2.1 丙三醇添加量对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响

由图 1(a) 可知, 随着丙三醇含量的增加, 蛋白质膜的水溶性先降低后升高, 这是因为当丙三醇添加量极少时, 丙三醇分子容易与蛋白质分子链的氨基酸残基和侧链基团形成氢键, 阻碍了蛋白膜的吸水性。当甘油添加量达 0.20 g/g 醇溶蛋白时蛋白膜水溶性最小, 为 24.96%。但是丙三醇含有亲水性羟基, 丙三醇添加量增大时与醇溶蛋白发生反应, 阻断疏水残留物, 视蛋白结构展开, 将埋藏的亲水区域暴露出来, 所以蛋白膜的水溶性开始变得越来越大。

由图 1(b) 可知, 随着丙三醇含量的增加, 玉米醇溶蛋白膜的  $CO_2$  透过率先降低后升高。丙三醇含量对  $CO_2$  透过率的影响在一定范围内不显著, 但随着丙三醇含量的增加, 影响开始显著<sup>[13]</sup>。这是因为甘油用量少时, 很难从环境中吸收水分, 空间结构稳定, 二氧化碳的传输速率小。随着甘油含量的增加, 蛋白质分子间的羟基数目增加, 从环境中吸收更多的水分子, 导致膜空间连接处变得致密疏松,  $CO_2$  透过性增加, 膜阻隔性能恶化, 当丙三醇添加量为 0.2 g/g 醇溶蛋白时,  $CO_2$  通过膜的透过率最小, 为 0.28 g/(m<sup>2</sup>·h)。

由图 1(c) 可知, 随着丙三醇添加量的逐渐增加, 玉米醇溶蛋白膜的水蒸气透过率先下降后逐渐增加, 当丙三醇添加量为 0.2 g/g 醇溶蛋白时, 膜的水蒸气透过系数最小, 为 6.93 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa)。这是因为非极性基团的数量和分布的影响, 丙三醇与玉米醇溶蛋白反应后, 溶液极性周围发生变化。而在其他点膜的水蒸气透过率效果较差, 这是因为丙三醇添加量较少时, 醇溶蛋白空间结构稳定不被破坏, 无法大量吸收水分。在添加量为 0.5 g/g 醇溶蛋白时, 效果最差, 这是因为丙三醇含有亲水性羟基, 加入丙三醇后与醇溶蛋白发生反应, 阻断疏水残留物, 视蛋白结构展开, 将埋藏的亲水区域暴露出来, 所以吸水最多, 水蒸气透过率最高。

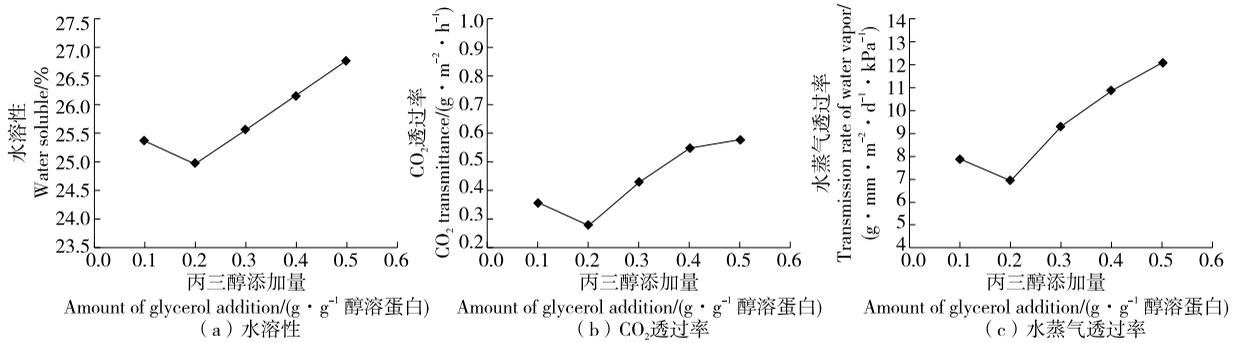


图1 丙三醇添加量对玉米醇溶蛋白膜性能的影响

Figure 1 Effect of glycerol addition on the performance of zein membrane

## 2.2 乙醇体积分数对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响

由图2(a)可知,随着乙醇体积分数的增加,蛋白质膜的水溶性也逐渐增加。在乙醇体积分数达到75%之前,有一个非常明显的上升趋势。当乙醇体积分数达到75%时,趋势趋于平缓,是因为乙醇体积分数越高,成膜液挥发越快,不利于蛋白质中氢键和S—S键的形成,导致蛋白质膜结构不够致密,分子间间隙较大,水溶性增大<sup>[14]</sup>。但此蛋白膜一般应用于蔬菜水果的保鲜上,因此蛋白膜的水溶性越小越好,综上,乙醇体积分数为70%时,蛋白膜的水溶性最小(21.67%)。

由图2(b)可知,蛋白膜的CO<sub>2</sub>透过率随乙醇体积分数的增加呈先减少再增多后平缓的趋势,这是由于一定体积分数的乙醇有助于提高蛋白分子间的相互作用,使其结构更致密,CO<sub>2</sub>透过率降低,但当乙醇体积分数突然增大时,阻碍了蛋白质分子间的作用,使其结构被干扰,故CO<sub>2</sub>透过率变大<sup>[15]</sup>。当乙醇体积分数为75%时,蛋白膜的CO<sub>2</sub>透过率最小,为0.26 g/(m<sup>2</sup> · h)。

由图2(c)可知,水蒸气透过率呈先下降后上升趋势,这是因为低浓度不利于玉米醇溶蛋白分子间的交联,玉米醇溶蛋白完全溶解,热组织,分子间隙小,可以形成均匀的网络结构,有效防止水蒸气的渗透。但过高的乙醇体积分数不利于分子流动,导致成膜不均匀、网格结构和间隙过大,进而导致水蒸气透过率的增加。乙醇体积分数为75%

时,水蒸气透过率值最低,为6.36 g · mm/(m<sup>2</sup> · d · kPa)。

## 2.3 超声时间对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响

由图3(a)可知,超声时间的不同对膜水溶性有显著性影响,且随超声时间的增大,膜的水溶性呈先减小后增加的趋势。这是由于超声波主要是以散发热量为主要形式,在这种环境下吸收能量,以此来提高水解反应速率,当超声时间较短时,会引起空化作用,导致部分底物被破坏,水解反应受到抑制,随着超声时间的增加,反应充分,蛋白分子需结合更多的水分子达到平衡,故水溶性又开始变大<sup>[16]</sup>。当超声时间为6 min时,膜的水溶性最小,为18.27%。

由图3(b)可知,随着超声时间的增加,蛋白质膜的CO<sub>2</sub>透过率先减小后增大,然后趋于平缓。这是因为适当的超声时间有助于改善蛋白质分子间的相互作用,使结构更加紧密,CO<sub>2</sub>透过率降低。但随着超声时间的增加,蛋白质分子间的相互作用受阻,结构受到干扰,CO<sub>2</sub>透过率增加。超声时间为6 min时,蛋白膜稳定,玉米醇溶蛋白膜的CO<sub>2</sub>透过率最小,为0.28 g/(m<sup>2</sup> · h)。

由图3(c)可知,超声时间的不同对膜水蒸气透过率有显著性影响,且随超声时间的增大,膜的水蒸气透过率先减小后增大。这是因为适当的超声时间有助于改善蛋白质分子间的相互作用,使其结构更加紧密,降低水蒸气的渗透性。但随着超声时间的增加,蛋白质分子间的相

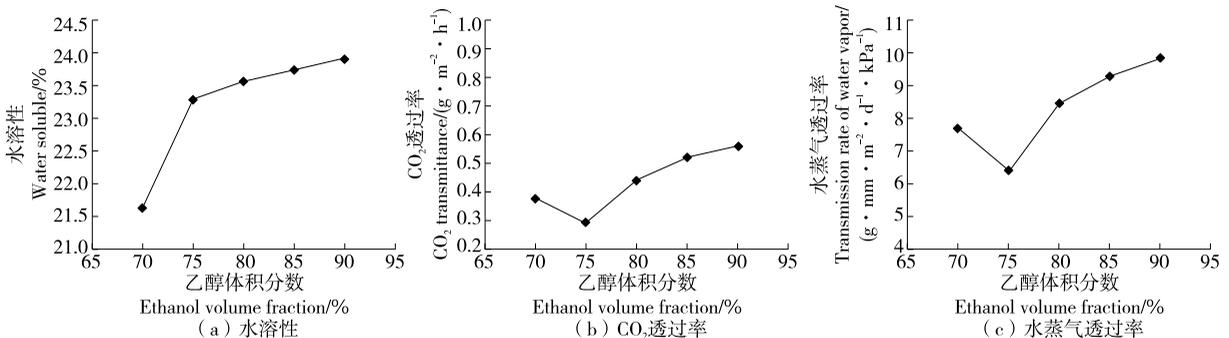


图2 乙醇体积分数对玉米醇溶蛋白膜性能的影响

Figure 2 Effect of ethanol concentration on the performance of zein membrane

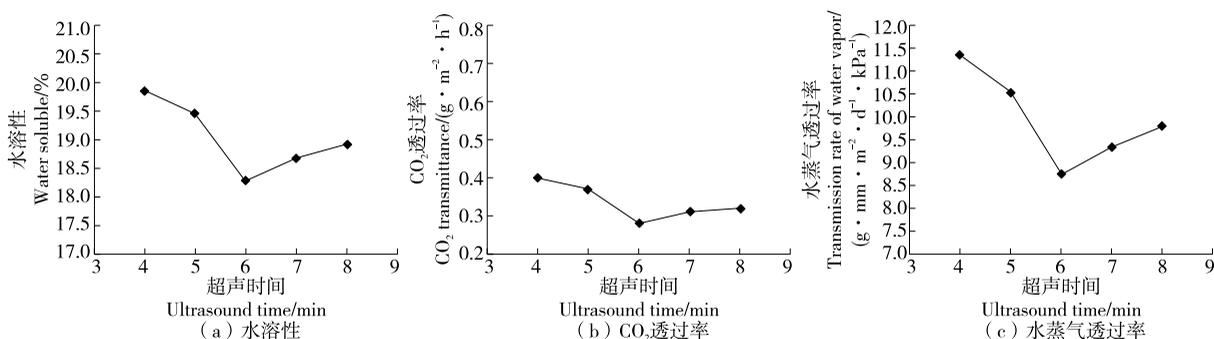


图 3 超声时间对玉米醇溶蛋白膜性能的影响

Figure 3 Effect of ultrasound time on zein membrane performance

相互作用受阻,结构受到干扰,水蒸气透过率增加。超声时间为 6 min 时,膜的水蒸气透过系数最小,为  $8.76 \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$ 。

#### 2.4 水浴温度对玉米胚芽粕醇溶蛋白膜性能的影响

由图 4(a)可知,随着水浴成膜温度的升高,玉米醇溶蛋白膜的水溶性先减小后增大。这可能是由于适当提高成膜温度改变了蛋白质的三维结构,分子中的疏水基团、—SH 和疏水氨基酸侧链残基充分暴露,而蛋白质分子通过水分散键和 S—S 键的结合形成更紧密的蛋白质网络结构,从而降低膜的水溶性<sup>[17]</sup>。但当水浴温度达到一定值时,成膜液的流动性随温度的升高而增大,导致溶剂蒸发迅速,成膜时间缩短,反应不足。成膜分子在分子间有序交联形成相对规则的聚集状态之前,会过早沉积和固定,薄膜中的水分含量也会降低,会吸收外界的水分,造成水溶性变大。当水浴温度为 60 °C 时,膜的水溶

性最小,为 19.64%。

由图 4(b)可知,玉米醇溶蛋白膜 CO<sub>2</sub> 透过率随水浴时间的增加呈先减少再增多后平缓的趋势。这是由于适当提高水浴温度有助于水分和乙醇的蒸发,成膜液黏度下降,流动性增大,大分子聚合物片段移动加快,蛋白质分子通过疏水键、S—S 键的结合形成比较严密、更紧凑的蛋白质网状结构,所以膜的 CO<sub>2</sub> 透过率会先降低,随着温度升高,蛋白开始明显变性,导致空间结构疏松,CO<sub>2</sub> 透过率又开始增大。当水浴温度为 60 °C 时,玉米醇溶蛋白膜的 CO<sub>2</sub> 透过率最小,为 0.39%。

由图 4(c)可知,水浴温度的不同对膜水蒸气透过率有显著性影响,且随着水浴温度的增大,蛋白膜的水蒸气透过率呈先降后升的趋势。这可能是由于适当提高成膜温度改变了蛋白质的三维结构,使分子中的疏水基团、—SH 和疏水氨基酸侧链残基充分暴露,而蛋白质分子通

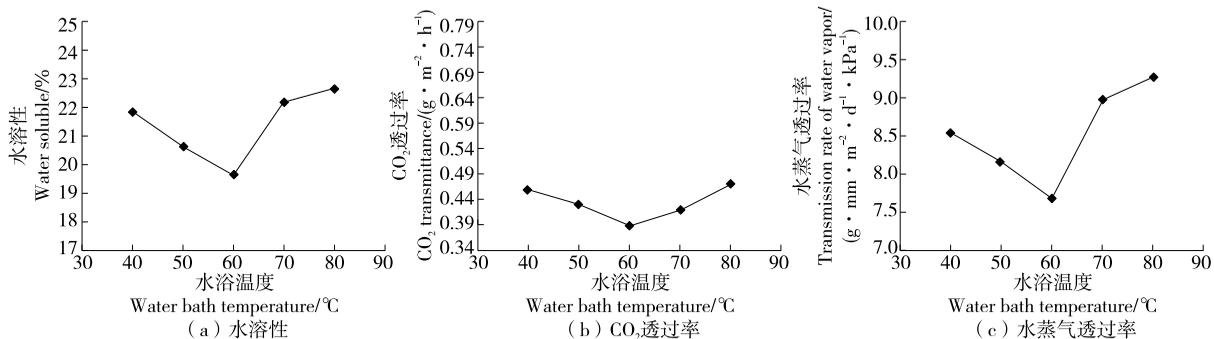


图 4 水浴温度对玉米醇溶蛋白膜性能的影响

Figure 4 Effect of water bath temperature on the performance of zein membrane

过水分散键和 S—S 键的结合,形成更紧密的蛋白质网络结构,使膜的水蒸气透过率变小。随着水浴温度升高,蛋白开始明显变性,导致空间结构疏松,膜的水蒸气透过率又开始增大。当水浴温度为 60 °C 时,膜的水蒸气透过系数最小,为  $7.68 \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$ 。

#### 2.5 正交试验

正交试验因素水平设计见表 2。

由表 3 可以看出,4 种因素对玉米醇溶蛋白膜水溶性

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factor level table of orthogonal test

水平	A 丙三醇添加量/ ( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 醇溶蛋白)	B 乙醇体积 分数/%	C 超声 时间/min	D 水浴 温度/°C
1	0.1	70	5	50
2	0.2	75	6	60
3	0.3	80	7	70

的影响顺序为 A>C>D>B,对玉米醇溶蛋白膜水蒸气透过率的影响顺序为 A>C>B>D,对玉米醇溶蛋白膜 CO<sub>2</sub>透过率的影响顺序为 A>C>B>D;通过正交试验确定 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>为最优组合,即丙三醇添加量为 0.3 g/g 醇溶蛋白,乙醇体积分数为 80%,超声时间为 5 min,水浴温度为 70 °C。与正交表中的最优组合 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>有差异,需要做一组(3个平行)验证实验确定最优组合,比较两个组合的 3 个性能见表 3。验证实验得出,丙三醇添加量为

0.3 g/g 玉米蛋白,乙醇体积分数为 80%,超声时间为 5 min,水浴时间为 70 °C是最优的组合。

2.6 抗氧化活性

由图 5 可以看出,随着反应时间的延长,两组样品切片颜色都在逐渐加深。涂膜处理的样品切片褐变指数的上升速度明显低于涂膜空白组,可见玉米胚芽粕醇溶蛋白膜在食品保鲜上效果得到增加,褐变速度降低,能起到抗氧化护色的目的。

表 3 正交试验结果分析表

Table 3 Orthogonal test results analysis table

序号	A	B	C	D	水溶性/%	水蒸气透过率/ (g · mm · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> · kPa <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 透过率/ (g · m <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> )
1	1	1	1	1	22.86	8.04	0.43
2	1	2	2	2	24.54	10.23	0.66
3	1	3	3	3	22.39	7.59	0.38
4	2	1	2	3	23.61	9.37	0.55
5	2	2	3	1	24.28	9.92	0.60
6	2	3	1	2	23.46	8.61	0.47
7	3	1	3	2	21.37	6.73	0.29
8	3	2	1	3	20.63	6.28	0.23
9	3	3	2	1	21.78	7.16	0.34
-----							
水溶性	K <sub>1</sub>	23.263	22.613	22.317	22.973		
	K <sub>2</sub>	23.783	23.150	23.310	23.123		
	K <sub>3</sub>	21.260	22.543	22.680	22.210		
	R <sub>1</sub>	2.523	0.607	0.993	0.913		
水蒸气透过率	K' <sub>1</sub>	8.620	8.047	7.643	8.373		
	K' <sub>2</sub>	9.300	8.810	8.920	8.523		
	K' <sub>3</sub>	6.723	7.787	8.080	7.747		
	R <sub>2</sub>	2.577	1.023	1.277	0.776		
CO <sub>2</sub> 透 过率	K'' <sub>1</sub>	0.490	0.423	0.377	0.547		
	K'' <sub>2</sub>	0.540	0.497	0.517	0.473		
	K'' <sub>3</sub>	0.287	0.397	0.423	0.387		
	R <sub>3</sub>	0.253	0.100	0.140	0.086		

表 4 组合 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub> 与组合 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub> 的比较

Table 4 Comparison of combination A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub> and combination A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>

工艺组合	水溶性/%	水蒸气透过率/ (g · mm · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> · kPa <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 透过率/ (g · m <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> )
A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	20.63	6.28	0.23
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	19.75	6.13	0.21

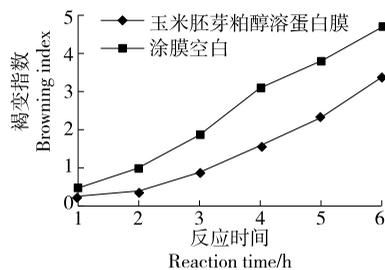


图 5 褐变指数与反应时间的关系

Figure 5 The relationship between browning index and reaction time

### 3 结论

玉米胚芽粕是玉米深加工的副产品,通常作为饲料使用,造成资源的过度浪费。其中,玉米胚芽粕的蛋白质含量约为 18%~20%,与玉米胚芽基本一致。利用玉米胚芽粕为原料制备醇溶蛋白膜,以水溶性、CO<sub>2</sub>透过率以及水蒸气透过率为指标,通过单因素试验和正交试验研究 4 种因素对玉米胚芽粕蛋白膜性能的影响。结果表明:在丙三醇添加量为 0.3 g/g 醇溶蛋白、超声时间为 5 min、乙醇体积分数为 80%、水浴温度为 70 °C 的条件下,玉米醇溶蛋白膜水溶性为 19.75%、CO<sub>2</sub>透过率为 0.21 g/(m<sup>2</sup>·h)、水蒸气透过率为 6.13 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa)。在优化玉米醇溶蛋白膜制备工艺的基础上,对玉米醇溶蛋白膜的抗氧化性进行了研究,发现其具有一定的抗氧化保鲜效果。后续将进一步研究明胶、壳聚糖等物质对以玉米胚芽粕为原料制备的玉米醇溶蛋白膜稳定性的影响。

#### 参考文献

[1] 张婷婷. 可食性玉米蛋白膜制备关键技术的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013: 3-4.  
ZHANG Ting-ting. Research on the key technology of preparing edible corn gluten film [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013: 3-4.

[2] 张雪娜, 任婷婷, 左春艳, 等. 可食性玉米醇溶蛋白膜的制备及其在食品保藏中的应用研究[J]. 粮食加工, 2012, 37(6): 34-37.  
ZHANG Xue-na, REN Ting-ting, ZUO Chun-yan, et al. Preparation of edible zein film and its application in food preservation[J]. Food Processing, 2012, 37(6): 34-37.

[3] 刘婷婷, 张颖, 李娜, 等. 超声波微波协同制备玉米醇溶蛋白/壳聚糖复合膜工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 1-5.  
LIU Ting-ting, ZHANG Ying, LI Na, et al. Ultrasonic and microwave synergistic preparation of zein/chitosan composite membrane technology[J]. Food Science, 2016, 37(20): 1-5.

[4] 贾祥祥. 制备条件对玉米醇溶蛋白膜性能的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012: 17-19.  
JIA Xiang-xiang. Study on the effect of preparation conditions on the performance of zein membrane [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012: 17-19.

[5] 曹思远, 陈修红, 王军. 玉米醇溶蛋白膜的制备研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(35): 17 314-17 315.  
CAO Si-yuan, CHEN Xiu-hong, WANG Jun. Preparation of zein film[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(35): 17 314-17 315.

[6] 崔和平, 贾祥祥, 鲁亚楠, 等. 制备条件对玉米醇溶蛋白膜水溶性的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2012(12): 37-41.  
CUI He-ping, JIA Xiang-xiang, LU Ya-nan, et al. The effect of preparation conditions on the water solubility of zein membranes[J]. Food and Feed Industry, 2012(12): 37-41.

[7] 许英一, 林巍. 玉米胚芽蛋白提取工艺的优化[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 88-90.

XU Ying-yi, LIN Wei. Optimization of corn germ protein extraction process[J]. Food Industry, 2019, 40(10): 88-90.

[8] 崔立平. 玉米胚芽油生产副产物——玉米胚芽粕中蛋白质提取的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2012: 11-12.  
CUI Li-ping. The by-product of corn germ oil production—The study of protein extraction from corn germ meal[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2012: 11-12.

[9] 肖志刚, 王娜, 杨庆余, 等. 大豆分离蛋白膜配方及性能研究[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(4): 476-481.  
XIAO Zhi-gang, WANG Na, YANG Qing-yu, et al. Study on the formula and performance of soybean protein isolate film[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2013, 31(4): 476-481.

[10] GHASEMLOU M, KHODAIYAN F, OROMIEHIE A, et al. Development and characterisation of a new biodegradable edible film made from kefiran, an exopolysaccharide obtained from kefir grains[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1 496-1 502.

[11] 李磊, 牛坤, 马庆一. 可食性膜阻水特性的研究[J]. 食品科学, 2008(2): 145-150.  
LI Lei, NIU Kun, MA Qing-yi. Study on the water blocking characteristics of edible membranes [J]. Food Science, 2008(2): 145-150.

[12] 肖永谦. V<sub>E</sub>对鲜切荸荠酶促褐变的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(10): 23-28.  
XIAO Yong-qian. Effect of V<sub>E</sub> on enzymatic browning of fresh-cut water chestnuts[J]. Fresh-keeping and Processing, 2021, 21(10): 23-28.

[13] 崔和平. 环境条件对玉米醇溶蛋白膜性能的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014: 78-85.  
CUI He-ping. Research on the effect of environmental conditions on zein membrane performance[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014: 78-85.

[14] 贾祥祥, 郭兴凤, 鲁亚楠, 等. 制备条件对玉米醇溶蛋白膜机械性能的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2012(7): 36-40.  
JIA Xiang-xiang, GUO Xing-feng, LU Ya-nan, et al. The effect of preparation conditions on the mechanical properties of zein membranes[J]. Food and Feed Industry, 2012(7): 36-40.

[15] 孙琳琳. 茶多酚脱脂豆粕膜的制备与应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 19-20.  
SUN Lin-lin. Preparation and application of tea polyphenol defatted soybean meal membrane [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017: 19-20.

[16] 孙天颖, 程红, 张明站, 等. 超声波辅助酶解玉米胚芽脱脂粕预处理条件的优化[J]. 中国调味品, 2020, 45(10): 36-39.  
SUN Tian-ying, CHENG Hong, ZHANG Ming-zhan, et al. Optimization of pretreatment conditions for ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis of corn germ defatted meal[J]. China Seasoning, 2020, 45(10): 36-39.

[17] CHO S Y, LEE S Y, RHEE C. Edible oxygen barrier bilayer film pouches from corn zein and soy protein isolate for olive oil packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1 234-1 239.