

# 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜性能及结构的影响

张慧芸, 郭新宇, 吴静娟

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**以玉米醇溶蛋白为原料制备可食性膜,将丁香精油添加到玉米醇溶蛋白膜中,研究其对玉米醇溶蛋白膜物理性能及微观结构的影响。结果表明,丁香精油体积分数在0.5%~2.0%范围内时,随着体积分数的增加,玉米醇溶蛋白膜的厚度、断裂伸长率和水蒸气透过系数逐渐增加。丁香精油体积分数为0.5%~1.0%时,玉米醇溶蛋白膜的拉伸强度显著增加( $P < 0.05$ )。添加丁香精油改善了膜的机械性能,增加了阻光性和透湿性。通过红外光谱和扫描电镜分析表明,添加丁香精油并未显著改变玉米醇溶蛋白的结构,且添加丁香精油的成膜液在干燥过程中会产生微孔,使得玉米醇溶蛋白膜的表面粗糙不均匀。

**关键词:**玉米醇溶蛋白; 丁香精油; 物理性能; 机械性能; 微观结构

## Effect of Clove Essential Oil on the Properties and Structure of Zein Edible Films

ZHANG Huiyun, GUO Xinyu, WU Jingjuan

(College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The aim of this work was to study the effects of incorporating clove essential oil (CEO) on the physical, mechanical, barrier properties and microstructure of zein films. The incorporation of CEO in the range of 0.5%–2.0% (*V/V*) increased the thickness, elongation at break, opacity and water vapor permeability of zein edible films in a concentration-dependent fashion. The addition of CEO at a level between 0.5% and 1.0% (*V/V*) significantly increased the tensile strength value ( $P < 0.05$ ). The incorporation of CEO improved mechanical properties and increased light-barrier property and moisture permeability. The structure of the films was characterized via Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the addition of CEO did not modify the chemical structure of films significantly. But the surface morphology of composite films was rough and uneven with more micropores.

**Key words:** zein; clove essential oil; physical characteristics; mechanical properties; microstructure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201612002

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2016)12-0007-06

引文格式:

张慧芸, 郭新宇, 吴静娟. 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜性能及结构的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 7-12.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201612002. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Huiyun, GUO Xinyu, WU Jingjuan. Effect of clove essential oil on the properties and structure of zein edible films[J]. Food Science, 2016, 37(12): 7-12. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201612002.

<http://www.spkx.net.cn>

随着消费者对食品品质、保藏期要求的提高以及环保意识的增强,以天然生物材料制成的可食性包装膜逐渐成为研究的热点。可食性膜是由多糖、蛋白质、脂质等大分子可食性材料制成的复合包装膜<sup>[1]</sup>。玉米醇溶蛋白不仅具有成膜性和天然的可生物降解能力,还具有阻气性、阻油性和一定的抗菌性,而且作为一种蛋白质具有

一定的营养价值、口感好、通透性小等特点,可以用于食品的保鲜和包装<sup>[2]</sup>。我国大部分的玉米用于生产淀粉,剩余的副产物中还含有大量的玉米醇溶蛋白,充分利用这些玉米醇溶蛋白作为食品的包装材料可以大大提高玉米的利用价值。

玉米醇溶蛋白膜以其可降解性引起了人们的关注,

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金-河南人才培养联合基金项目(C2003)

作者简介: 张慧芸(1977—),女,副教授,博士,主要从事天然产物活性研究。E-mail: zhanghuiyun21@163.com

但传统的玉米醇溶蛋白膜拉伸强度、延展性不理想,纯玉米醇溶蛋白膜较脆,塑性较差,限制了其在食品、药品包装领域中的应用<sup>[3]</sup>,因此国内外研究者致力于向玉米醇溶蛋白膜中加入一种或多种物质对其进行改性,如加入多酚化合物<sup>[4]</sup>、多糖类<sup>[5]</sup>、蛋白类<sup>[2]</sup>、酸类<sup>[6]</sup>、甘油<sup>[7]</sup>等物质来改善玉米醇溶蛋白膜的各种性能。

丁香精油作为一种香辛料,其中含有的丁香酚具有一定的抗氧化和抗菌性,是安全、高效、无毒的天然食品防腐剂的良好来源。近年来有研究<sup>[8-9]</sup>将丁香精油加入到可食性包装膜改善膜的物理性能。向玉米醇溶蛋白膜中加入丁香精油的研究鲜见报道,本研究以玉米醇溶蛋白为成膜原料,甘油作为增塑剂,将丁香精油加入成膜液中,制备玉米醇溶蛋白膜,研究丁香精油对玉米醇溶蛋白膜物理性能、机械性能和微观结构的影响,为开发新型的玉米醇溶蛋白膜提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

玉米醇溶蛋白(含氮量 $\geq 85\%$ ,水分含量 $\leq 8\%$ ) 武汉远程共创科技有限公司;丁香精油(丁香酚质量分数 $\geq 85\%$ ) 珍恋丁香精油批发商行;甘油、乙醇 天津市德恩化学试剂有限公司;无水氯化钙 天津市津北化工有限公司。

### 1.2 仪器与设备

恒温鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;5544Q6427质构仪 美国英斯特朗公司;color i5色差计 美国Xrite公司;JSM-5610LV扫描电子显微镜 日本Jeol公司;8000S傅里叶变换红外光谱 日本岛津公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 玉米醇溶蛋白膜的制备

参考贾祥祥<sup>[10]</sup>的方法略有修改,用体积分数为80%的乙醇溶液配制蛋白质量浓度为10 g/100 mL的玉米醇溶蛋白溶液,在磁力搅拌器上搅拌10 min,再加入0.3 g/g玉米醇溶蛋白的甘油,在80℃的水浴锅中加热15 min,再在成膜液中加入体积分数分别为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的丁香精油,以未添加丁香精油的玉米醇溶蛋白膜为对照。在10 000 r/min条件下均质4 min,吸取2 mL的成膜液在有机玻璃板上成膜,在60℃干燥3 h成膜,在含有二氧化硅的干燥器中室温条件下平衡48 h。

#### 1.3.2 玉米醇溶蛋白膜性能的测定

##### 1.3.2.1 厚度

将一张膜片对折4次,并在其中心和四周共选取9个点用螺旋测微仪来测量,得到8层膜的平均厚度,再取平均值得到单层膜的厚度。

##### 1.3.2.2 机械强度(拉伸强度和断裂伸长率)

参考Yin Shouwei等<sup>[11]</sup>的方法,用质构仪来测定膜的拉伸强度和断裂伸长率,将膜切成10 mm $\times$ 50 mm的条带,初始夹距为30 mm,拉伸速率为1 mm/s,每种膜测定5个样品。拉伸强度和断裂伸长率的计算如式(1)、(2)所示:

$$\text{拉伸强度/MPa} = \frac{F_t}{L \times D} \quad (1)$$

式中: $F_t$ 为最大拉力/N; $L$ 为膜样品的厚度/mm; $D$ 为膜样品的宽度/mm。

$$\text{断裂伸长率/\%} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: $L_1$ 为膜断裂后的长度/mm; $L_0$ 为膜断裂前的长度/mm。

##### 1.3.2.3 颜色

使用色差仪对玉米醇溶蛋白膜进行测定,参照Cielab系统来表示玉米醇溶蛋白膜的颜色<sup>[12]</sup>,测试记录+ $L$ 为亮色方向,- $L$ 为暗色方向;+ $a$ 值为红色方向,- $a$ 为绿色方向;+ $b$ 为黄色方向,- $b$ 为蓝色方向。将膜样品置于标准校正板上测量,标准板的色度值为: $L=94$ , $a=0.313$ , $b=0.319$ 。每个样品选择5个点进行测量,一个点从中央选取,另外沿着膜四周取4个点,取平均值。指标色差值 $\Delta E$ 计算如式(3)所示:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad (3)$$

式中: $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 是待测膜的色度值; $L$ 、 $a$ 、 $b$ 是标准板的色度值。

##### 1.3.2.4 透明度

参考Shiku等<sup>[13]</sup>的方法将待测样品裁成10 mm $\times$ 50 mm的矩形,贴于比色皿内侧,在600 nm波长条件下测定透过率,以空比色皿作为对照,透明度计算如式(4)所示(透明度数值越大,说明膜越不透明):

$$\text{透明度} = \frac{-\lg T_{600 \text{ nm}}}{X} \quad (4)$$

式中: $T_{600 \text{ nm}}$ 为膜在600 nm波长处的透过率/%; $X$ 为膜的厚度/mm。

##### 1.3.2.5 水蒸气透过系数

根据GB 1037—1988《塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法》,采用拟杯子法<sup>[14]</sup>,将完整均匀的膜密封在含有5 g无水氯化钙(相对湿度为0)的有机玻璃透湿杯表面,膜外露面积为19.6 cm<sup>2</sup>。将透湿杯装置放入恒温恒湿箱中(相对湿度80%,25℃),每隔24 h测定透湿杯的增质量。水蒸气透过系数计算如式(5)所示:

$$\text{水蒸气透过系数} / ((\text{g} \cdot \text{m}) / (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})) = \frac{M \times X}{t \times \Delta P \times A} \quad (5)$$

式中: $M$ 为透湿杯的增质量/g; $X$ 为膜的厚度/mm;

$A$ 为膜外露面积 ( $19.6\text{ cm}^2$ ) ;  $t$ 为测量间隔时间 (24 h) ;  $\Delta P$ 为膜两侧的水蒸气压差, 由于膜两侧的相对湿度梯度为100%, 测定温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 故 $\Delta P$ 为 $2.535\text{ kPa}$ 。

### 1.3.2.6 微观结构观察

用扫描电子显微镜, 将样品膜固定于铜柱体上, 通过溅射器喷金处理后, 扫描样品膜的表面结构。

### 1.3.2.7 红外光谱分析

用傅里叶变换红外光谱仪测定样品膜的红外光谱。测定波数为 $4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ , 分辨率为 $4\text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数为32次。

## 1.4 数据分析

所得数据均为3次重复的平均值, 使用SPSS 22.0软件处理数据, ANOVA法进行方差分析, Duncan多重比较检验法进行显著性分析 ( $P<0.05$ )。用Origin Pro 8.5作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜厚度、颜色和透明度的影响

**表 1 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜厚度、颜色和透明度的影响**  
**Table 1 Thickness, color and transparency value of zein films incorporated with CEO**

丁香精油 体积分数/%	厚度/ $\mu\text{m}$	颜色值			$\Delta E$	透明度
		$L^*$	$a^*$	$b^*$		
0 (对照)	$10.32\pm 0.04^d$	$93.19\pm 0.29^a$	$-0.11\pm 0.05^a$	$0.37\pm 0.04^a$	$0.93\pm 0.06^d$	$9.69\pm 0.33^c$
0.5	$10.46\pm 0.13^{cd}$	$92.75\pm 0.45^{ab}$	$-0.14\pm 0.03^{ab}$	$0.46\pm 0.11^a$	$1.35\pm 0.41^{cd}$	$9.88\pm 0.39^{bc}$
1.0	$10.66\pm 0.14^c$	$92.25\pm 0.59^{bc}$	$-0.19\pm 0.04^{ab}$	$0.52\pm 0.12^{bc}$	$1.83\pm 0.57^{cd}$	$10.11\pm 0.55^{bc}$
1.5	$11.16\pm 0.11^b$	$91.64\pm 0.59^{cd}$	$-0.24\pm 0.07^{bc}$	$0.66\pm 0.09^{bc}$	$2.44\pm 0.59^{cd}$	$10.53\pm 0.40^{bc}$
2.0	$11.60\pm 0.09^a$	$91.33\pm 0.11^d$	$-0.32\pm 0.07^c$	$0.82\pm 0.09^b$	$2.79\pm 0.11^d$	$10.92\pm 0.31^a$

注: 同列不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

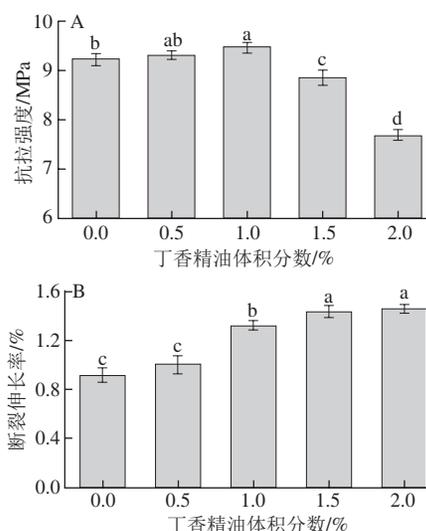
由表1可以看出, 添加丁香精油增加了膜的厚度, 玉米醇溶蛋白膜厚度的变化范围为 ( $10.32\pm 0.04$ ) ~ ( $11.60\pm 0.09$ )  $\mu\text{m}$ 。与对照膜相比, 丁香精油体积分数在0.5%时, 玉米醇溶蛋白膜的厚度变化差异不显著 ( $P>0.05$ ) ; 丁香精油体积分数在1.0%时, 膜厚度变化差异显著 ( $P<0.05$ )。这是由于向成膜液中加入不溶性物质, 增加了膜结构的疏松度, 从而增加了膜的厚度, 随着不溶性物质增多, 膜的厚度不断增加<sup>[15]</sup>。

随着丁香精油体积分数的增加, 玉米醇溶蛋白膜的 $L^*$ 值从93.19减小到91.33; 其 $a^*$ 值从-0.11减小到-0.32,  $b^*$ 值从0.37增加到0.82, 说明添加丁香精油增加了膜的绿度值和黄度值。与对照膜相比, 丁香精油体积分数为1.0%时, 玉米醇溶蛋白膜的 $L^*$ 值显著降低 ( $P<0.05$ ) ; 丁香精油体积分数为1.5%时, 玉米醇溶蛋白膜的 $a^*$ 值显著降低 ( $P<0.05$ ) ,  $b^*$ 值显著增加

( $P<0.05$ )。对照膜的 $\Delta E$ 为0.93, 丁香精油体积分数为1.0%时, 玉米醇溶蛋白膜的 $\Delta E$ 值与对照膜差异显著 ( $P<0.05$ )。Bárbara等<sup>[16]</sup>在鱼蛋白膜中加入大蒜精油、丁香精油和牛至精油, 结果表明, 丁香精油降低了膜的 $L^*$ 值, 大蒜精油增加了膜的 $b^*$ 值, 牛至精油降低了膜的 $a^*$ 值, 说明精油种类和添加量的不同对膜色度值的影响效果也不同。

从表1可以看出, 随着丁香精油体积分数的增加, 玉米醇溶蛋白膜的透明度数值逐渐增大, 当丁香精油体积分数为0.5%~1.0%时, 玉米醇溶蛋白膜的透明度与对照膜相比差异不显著 ( $P>0.05$ )。说明添加丁香精油会使膜的透明程度降低, 从膜的颜色参数 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 值也可看出相似的结果。丁香精油中的彩色成分和有序膜蛋白网络结构的破坏是导致膜透明程度降低的最主要原因<sup>[17]</sup>。添加丁香精油可能会影响膜外观, 但增加了膜的光阻隔性能。

### 2.2 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜机械性能的影响



小写字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ ) , 下同。

**图 1 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜拉伸强度 (A) 和断裂伸长率 (B) 的影响**

**Fig. 1 Tensile properties and elongation at break of zein edible films incorporated with CEO**

由图1A可以看出, 丁香精油体积分数为0.5%~1.0%时, 拉伸强度逐渐增加, 添加1.0%丁香精油的膜拉伸强度与对照膜相比差异显著 ( $P<0.05$ ) , 这可能是由于丁香精油的添加, 使膜中的酚类、醛类、醇类等物质密度增大, 对膜的交联作用以及增塑作用增强<sup>[18]</sup>。Atarés等<sup>[19]</sup>向乳清蛋白中加入肉桂丁香精油, 膜的拉伸强度得到一定的增强。当丁香精油体积分数为1.5%~2.0%时, 膜的拉伸强度明显下降 ( $P<0.05$ ) , 说明大量的丁香精油加入到成膜液中, 破坏了玉米醇溶蛋白间的相互作用, 降低了高聚物分子间

作用力, 减弱了玉米醇溶蛋白膜的抗断裂能力, 降低了膜的拉伸强度<sup>[20]</sup>。由图1B可以看出, 随着丁香精油体积分数的增加, 玉米醇溶蛋白膜的断裂伸长率逐渐增大, 当丁香精油体积分数为1.0%时, 玉米醇溶蛋白膜的断裂伸长率与对照相比差异显著 ( $P < 0.05$ )。这是由于丁香精油中的酚醛类化合物削弱了多肽链间的疏水相互作用, 增强了多肽链的流动性和弹性, 软化了膜的刚性结构, 增加柔韧性, 提高了玉米醇溶蛋白膜的断裂伸长率<sup>[17]</sup>。因此可以将丁香精油加入到蛋白膜中, 增强膜的机械强度。由图1可以看出, 丁香精油体积分数为1.0%时玉米醇溶蛋白膜的机械性能较好。

### 2.3 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜水蒸气透过系数的影响

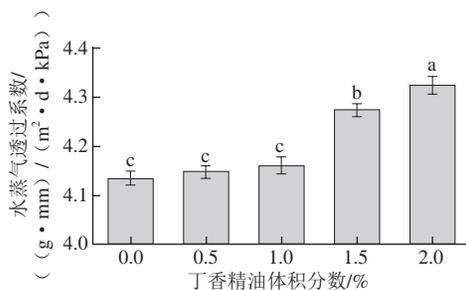


图2 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜水蒸气透过系数的影响

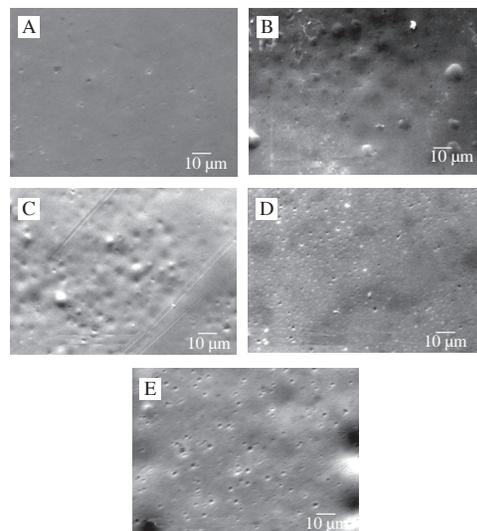
Fig. 2 Water vapor permeability of zein edible films incorporated with CEO

由图2可以看出, 未添加丁香精油时, 玉米醇溶蛋白膜水蒸气透过系数最低为  $(4.13 \pm 0.01)$   $(\text{g} \cdot \text{mm}) / (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{kPa})$ , 丁香精油体积分数为0.5%~1.0%时, 膜的透湿性有所增加, 但差异不显著, 而体积分数在1.5%时, 玉米醇溶蛋白膜的水蒸气透过系数显著增大 ( $P < 0.05$ )。水蒸气透过系数的增加与膜的结构有很大的关系, 向膜中加入油滴, 打破了膜原有的蛋白质网络结构, 降低了分子间的作用力, 增加了膜内部结构的疏散度, 增强了多肽链的流动性<sup>[21]</sup>, 因此水蒸气的透过系数增加, 提高了膜的透湿性, 降低其阻水性能。Song等<sup>[9]</sup>向鸡蛋白膜中加入丁香精油, 其水蒸气透过系数增大, 且在丁香精油体积分数为1.5%时, 水蒸气透过系数最大。另一方面由膜的扫描电镜图可以看出, 添加丁香精油使膜在干燥过程中形成空洞, 增加了水分的透过率和透湿性, 丁香精油体积分数越大, 增加的空洞越多, 水蒸气透过率越大。Altiok等<sup>[22]</sup>向壳聚糖膜中添加百里香精油, 结果表明水蒸气透过系数的增加与膜的空洞结构有很大关系。

### 2.4 添加丁香精油玉米醇溶蛋白膜的扫描电镜分析

如图3所示, 对照膜较光滑、均匀、连续。丁香精油体积分数为0.5%和1.0%的玉米醇溶蛋白膜会产生少量的微孔且凹凸不平; 当体积分数为1.5%和2.0%时, 玉米醇溶蛋

白膜表面出现较多微孔。这些微孔的产生可能与成膜(干燥)过程中丁香精油的蒸发有关<sup>[23]</sup>。丁香精油的添加导致膜形成较多的微孔和不连续的结构, 表面较粗糙, 这也可能与脂质分子在膜干燥期间的聚合有关系<sup>[24]</sup>。因为脂肪液滴集中于疏水基质, 嵌入由蛋白质组成的连续大分子聚合物中, 打破原有基质, 增加了膜的不均匀性, 使膜的表面粗糙<sup>[25]</sup>。

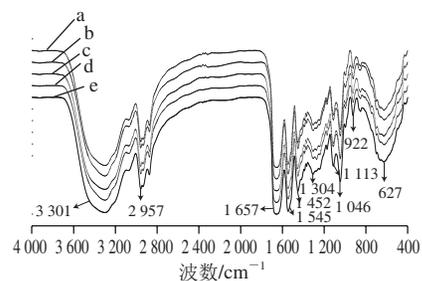


A~E.丁香精油体积分数分别为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%。

图3 添加丁香精油对玉米醇溶蛋白微观结构的影响

Fig. 3 SEM micrographs of zein edible films incorporated with essential oil

### 2.5 添加丁香精油玉米醇溶蛋白膜的红外图谱分析



a~e.丁香精油体积分数分别为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%。

图4 添加丁香精油的玉米醇溶蛋白膜的红外图谱

Fig. 4 FTIR spectra of zein edible films incorporated with CEO

由图4可以看出, 对照膜和添加丁香精油的膜呈现出相似的峰值。图中玉米醇溶蛋白膜在波数  $3400 \sim 3100 \text{ cm}^{-1}$  之间有较宽的吸收峰, 这是由于官能团N—H中氢键的伸缩振动。玉米醇溶蛋白膜在波数  $3000 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$  之间有两个峰分别为—CH<sub>3</sub>和—CH<sub>2</sub>中C—H的伸缩振动<sup>[26]</sup>。所有膜在波数为  $1700 \sim 650 \text{ cm}^{-1}$  时都有出现相似的峰, 包括酰胺 I 带、II 带和III带<sup>[27]</sup>。  $1657 \text{ cm}^{-1}$  左右有较宽的吸收峰, 为—C=O伸缩振动或N—H弯曲振动, 为酰胺 I 带。  $1545 \text{ cm}^{-1}$  左右为N—H

弯曲振动,为酰胺Ⅱ带。Su Junfeng等<sup>[28]</sup>表明在波数为 $1\ 472\sim 1\ 241\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰主要来源于C—N的伸缩振动和N—H的弯曲振动,为酰胺Ⅲ带。所有的膜在波数为 $1\ 046\ \text{cm}^{-1}$ 左右有强峰,为官能团—OH,主要来源于膜中添加的增塑剂甘油<sup>[29]</sup>。

由以上分析可知,添加丁香精油并未出现新的峰,说明在玉米醇溶蛋白膜中添加丁香精油并未显著改变玉米醇溶蛋白的结构,Wu Yunpeng等<sup>[30]</sup>将丁香精油通过液-液分散的方法密封在玉米醇溶蛋白纳米粒子中,分析其傅里叶变换红外谱图发现添加丁香精油并未改变蛋白的结构。

### 3 结 论

添加丁香精油改善了玉米醇溶蛋白膜的物理性能。丁香精油体积分数为0.5%~2.0%时,随着丁香精油体积分数的增加,玉米醇溶蛋白膜的厚度、断裂伸长率、透明度和水蒸气透过系数逐渐增加,玉米醇溶蛋白膜的拉伸强度先增加后降低。当丁香精油体积分数为1.0%时,膜的拉伸强度和断裂伸长率显著增加,与对照膜相比差异显著( $P<0.05$ );丁香精油体积分数为1.5%时,添加丁香精油对玉米醇溶蛋白膜水蒸气透过系数和透明度的影响差异显著( $P<0.05$ );添加丁香精油降低了膜的 $L^*$ 值和 $a^*$ 值,增加了膜的 $b^*$ 值,丁香精油体积分数为1.0%时, $\Delta E$ 值显著增加( $P<0.05$ )。添加丁香精油改善了膜的机械性能,增加了膜的阻光性和透湿性。

通过红外光谱和扫描电镜分析表明,丁香精油与玉米醇溶蛋白并未发生化学变化,仅仅是物理性结合,且添加丁香精油的成膜液在干燥过程中会产生微孔,使得玉米醇溶蛋白膜的表面粗糙不均匀。虽然添加丁香精油改善了玉米醇溶蛋白膜的拉伸强度和断裂伸长率,但其机械性能仍然较低,向其中加入交联剂等活性物质来提高其机械强度还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] GHANBARZADEH B, OROMIEHIE A R, MUSAVI M, et al. Effect of plasticizing sugars on rheological and thermal properties of zein resins and mechanical properties of zein films[J]. Food Research International, 2006, 39(8): 882-890. DOI:10.1016/j.foodres.2006.05.011.
- [2] GHANBARZADEH B, OROMIEHIE A R. Biodegradable biocomposite films based on whey protein and zein: barrier, mechanical properties and AFM analysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2008, 43(2): 209-215. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2008.05.006.
- [3] 陈野,李鹏,罗垠.玉米醇溶蛋白/纳米二氧化钛复合膜的制备及性质[J].食品科学,2011,32(14):56-60.
- [4] ARCAN I, YEMENICIOĞLU A. Incorporating phenolic compounds opens a new perspective to use zein films as flexible bioactive packaging materials[J]. Food Research International, 2011, 44(2): 550-556. DOI:10.1016/j.foodres.2010.11.034.
- [5] ESCAMILLA-GARCIA M, CALDERÓN-DOMÍNGUEZ G, CHANONA-PÉREZ J J, et al. Physical and structural characterisation of zein and chitosan edible films using nanotechnology tools[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 61: 196-203. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2013.06.051.
- [6] SINGH N, GEORGET D M R, BELTON P S, et al. Physical properties of zein films containing salicylic acid and acetyl salicylic acid[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(2): 282-287. DOI:10.1016/j.jcs.2010.06.008.
- [7] LIANG Jun, XIA Qiuyang, WANG S, et al. Influence of glycerol on the molecular mobility, oxygen permeability and microstructure of amorphous zein films[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 94-100. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.09.002.
- [8] 张慧芸,郭新宇,康怀彬,等.添加适量丁香精油提高大豆分离蛋白膜性能[J].农业工程学报,2014,30(4):247-254. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.04.030.
- [9] SONG N B, LEE J H, MIJAN M A, et al. Development of a chicken feather protein film containing clove oil and its application in smoked salmon packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(2): 453-460. DOI:10.1016/j.lwt.2014.02.009.
- [10] 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,2012:12-14.
- [11] YIN Shouwei, TANG Chuanhe, WEN Qibiao, et al. Properties of cast films from hemp (*Cannabis sativa* L.) and soy protein isolates a comparative study[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(18): 7399-7404. DOI:10.1021/jf071117a.
- [12] 叶文斌,樊亮,贡汉伯.添加中草药对黄原胶-长角豆半乳甘露聚糖复合膜性质的影响[J].食品科学,2012,34(13):24-28. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201313006.
- [13] SHIKU Y, HAMAGUCHI P Y, BENJAKUL S, et al. Effect of surimi quality on properties of edible films based on Alaska Pollack[J]. Food Chemistry, 2004, 86(4): 493-499. DOI:10.1016/j.foodchem.2003.09.022.
- [14] 彭勇,李云飞,项凯翔.绿茶多酚提高壳聚糖包装膜的抗氧化性能[J].农业工程学报,2013,29(14):269-276. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.034.
- [15] BENAVIDES S, VILLALOBOS-CARVAJAL R, REYES J. Physical, mechanical and antibacterial properties of alginate film: effect of the crosslinking degree and oregano essential oil concentration[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(2): 232-239. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2011.05.023.
- [16] BÁRBARA T, ANTÓNIO M, PIRES C, et al. Characterization of fish protein films incorporated with essential oils of clove, garlic and organum: physical, antioxidant and antibacterial properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59: 533-539. DOI:10.1016/j.lwt.2014.04.024.
- [17] SOLIMAN E A, KHALIL A A, DERAZ S F, et al. Synthesis, characterization and antibacterial activity of biodegradable films prepared from Schiff bases of zein[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(10): 2425-2434. DOI:10.1016/j.carbpol.2014.03.044.

- [18] 张赟彬, 王景文, 李月霞, 等. 薰衣草精油改善壳聚糖基食品包装膜的应用品质[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 286-291. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.02.037.
- [19] ATARÉS L, JESUS C D, TALENS P. Characterization of SPI-based edible films incorporated with cinnamon or ginger essential oils[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(3): 384-391. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.03.004.
- [20] AGUIRREA A, BORNEOA R, LEON A E. Antimicrobial, mechanical and barrier properties of triticale protein films incorporated with oregano essential oil[J]. Food Bioscience, 2013, 1: 2-9. DOI:10.1016/j.fbio.2012.12.001.
- [21] HUSSEIN M H, RAZAVI S H, MOUSAVI M A. Antimicrobial, physical and mechanical properties of chitosan-based films incorporated with thyme, clove and cinnamon essential oils[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2009, 33(6): 727-743. DOI:10.1111/j.1745-4549.2008.00307.x.
- [22] ALTIOK D, ALTIOK E, TIHMINLIOGLU F. Physical, antibacterial and antioxidant properties of chitosan films incorporated with thyme oil for potential wound healing applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2010, 21(7): 2227-2236. DOI:10.1007/s10856-010-4065-x.
- [23] SALGADO P R, LÓPEZ-CABALLERO M E, GÓMEZ-GUILLÉN M C, et al. Sunflower protein films incorporated with clove essential oil have potential application for the preservation of fish patties[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(1): 74-84. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.02.008.
- [24] FABRA M J, PEREZ-MASIÁ R, TALENS P, et al. Influence of the homogenization conditions and lipid self-association on properties of sodium caseinate based films containing oleic and stearic acids[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 1112-1121. DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.10.008.
- [25] JIMENEZ A, FABRA M J, TALENS P, et al. Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier properties of corn starch films containing fatty acids[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(1): 302-310. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.06.009.
- [26] YIN Huayue, LU Tao, LIU Li, et al. Preparation, characterization and application of a novel biodegradable macromolecule: carboxymethyl zein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 482-483. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2014.08.025.
- [27] ARFAT Y A, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Properties and antimicrobial activity of fish protein isolate/fish skin gelatin film containing basil leaf essential oil and zinc oxide nanoparticles[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 41: 270-271. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.04.023.
- [28] SU Junfeng, HUANG Zhen, YUAN Xiaoyan, et al. Structure and properties of carboxymethyl cellulose/soy protein isolate blend edible films crosslinked by Maillard reactions[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(1): 145-153. DOI:10.1016/j.carbpol.2009.07.035.
- [29] HOSSEINI S F, REZAEI M, ZANDI M, et al. Bio-based composite edible films containing *Origanum vulgare* L. essential oil[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 67: 407-408. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.01.062.
- [30] WU Yunpeng, LUO Yaguang, WANG Qin. Antioxidant and antimicrobial properties of essential oils encapsulated in zein nanoparticles prepared by liquid-liquid dispersion method[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(2): 286-287. DOI:10.1016/j.lwt.2012.03.027.