

肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜性能的影响

马中苏, 隋思瑶, 张宁, 王亚静, 陈珊珊

(吉林大学生物与农业工程学院, 吉林长春 130022)

摘要: 为了研究新型高性能抗菌包装材料, 本文将肉桂醛添加到浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜中制成抗菌复合膜, 采用 FT-IR 对复合膜的微观结构进行表征, 研究了肉桂醛浓度对复合膜厚度、透光率、机械性能、水蒸气透过系数、氧气透过率等性质的影响, 及其对复合膜抗菌性能的影响。肉桂醛与浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜有很好的相容性。结果表明: 随着肉桂醛浓度的增加, 膜的透光率和抗拉强度减小, 当肉桂醛浓度为 0.3% 时, 膜的水蒸气透过系数最小, 为 $1.15 \times 10^{-13} \text{ g}/(\text{cm s Pa})$, 当肉桂醛浓度为 0.4% 时, 膜的厚度和氧气透过率最小, 氧气透过率为 $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d Pa})$, 当肉桂醛浓度为 0.5% 时, 膜的断裂伸长率最大, 为 57.5%, 膜的抑菌效力随着肉桂醛浓度的增大而显著增大。该研究可为肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合抗菌膜的生产工艺参数的优化提供新的参考。

关键词: 肉桂醛; 膜; 性能; 抗菌性

文章编号: 1673-9078(2015)2-113-118

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.2.020

Effects of Cinnamaldehyde Concentrations on the Performance of Whey Protein Concentrate-Chitosan Composite Film

MA Zhong-su, SUI Si-yao, ZHANG Ning, WANG Ya-jing, CHEN Shan-shan

(College of Biological & Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Cinnamaldehyde was added into a whey protein concentrate-chitosan composite film to prepare an antibacterial composite film. The microstructures of the composite films were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and the effects of cinnamaldehyde concentrations on the thickness, transmittance, mechanical properties, water vapor permeability, oxygen permeability, and antibacterial properties of the composite film were studied. Cinnamaldehyde was found to have a good compatibility with the whey protein concentrate-chitosan composite film. The results indicated that the transmittance and tensile strength of the film decreased with increasing cinnamaldehyde concentration. When the cinnamaldehyde concentration was 0.3%, the lowest water vapor permeability ($1.15 \times 10^{-13} \text{ g cm}^2/\text{s Pa}$) was obtained. The lowest film thickness and oxygen permeability ($1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d Pa}$) were observed at a cinnamaldehyde concentration of 0.4%. When the cinnamaldehyde concentration was 0.5%, the elongation at break was the highest (57.5%). The antibacterial efficiency of the film increased with the increasing cinnamaldehyde concentration. The results obtained in this study can provide a new reference for optimizing the processing parameters in the production of cinnamaldehyde-whey protein concentrate-chitosan antimicrobial composite films.

Key words: cinnamaldehyde; films; performance; antibacterial activity

近年来, 可食性生物聚合包装由于其来源广泛, 无毒无污染, 具备一定的物理、化学性质等优点, 迅速成为食品、药品和包装领域的研究热点^[1-2]。

植物精油由于其优良的抗菌性及抗氧化性而备受青睐^[3-4], 植物精油是萃取植物特有的芳香物质, 从植物的花、叶、根、茎、树皮、果实、种子、树脂等以蒸馏、压榨方式提炼出来的挥发性油状液体, 不同提

取方法其生物活性也不尽相同^[5-7]。肉桂醛做为肉桂精油的主要成分具有浓郁的桂油芳香味, 并且有很好的防腐保鲜及持香作用^[8]。肉桂醛广泛的应用于香料、保鲜防霉剂、饲料、保健品、制药、日用、精细化工等方面, 此外, 肉桂醛也应用于生产塑料和感光材料等产品中^[9]。肉桂醛副作用少, 来源广泛, 不易出现耐药性, 具有良好的抗菌效果^[10], 但将肉桂醛做为组分添加到可食膜中的研究甚少。壳聚糖是多糖类生物大分子, 具有良好的成膜性, 生物相容性和生物降解性。浓缩乳清蛋白具有良好的营养特性、成膜性以及优良的阻隔性。本课题组通过前期研究已制备出了浓

收稿日期: 2014-07-09

基金项目: “863” 国家高技术研究发展计划项目 (2008AA10Z308)

作者简介: 马中苏 (1952-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事食品保藏与物流研究

浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜, 结果得出超声波微波协同作用时间 5 min、浓缩乳清蛋白与壳聚糖成膜比例为 5.8:6.2、山梨醇质量浓度 0.021 g/mL、pH 值 5.13 时, 此时浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜各项性能均较好^[11]。本文将不同浓度的肉桂醛添加到浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜中, 制备出了一种既具有高效的抗菌性又具有优良成膜性及理化性质的复合可食膜, 通过研究肉桂醛的浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜物理性质、机械性能、微观结构及抗大肠杆菌性能的影响, 为肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜的实际应用提供新的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

壳聚糖(脱乙酰度 95%), 国药集团化学试剂有限公司; 浓缩乳清蛋白(蛋白质质量分数 80%)、冰醋酸(AR)均购于天津市光复精细化工研究所; 山梨醇(AR)、氢氧化钠(AR)、盐酸(AR)均购于北京鼎国生物科技有限公司; 肉桂醛(纯度 99%, 食品级), 武汉远城科技发展有限公司; 大肠杆菌, 由吉林大学生物与农业工程学院生物实验室提供。

1.2 仪器与设备

自制成膜器(20 cm×20 cm 有机玻璃板); XO-SM50 型超声波微波组合系统, 南京先欧仪器制造有限公司; TSY-T1L 型透湿性测试仪、XLW(B)型智能电子拉力试验机均购于济南兰光机电技术有限公司; GDP-C 型气体渗透性测试仪, 德国 Brugger 公司; Nexus-670 型傅里叶变换红外光谱仪, 美国 Nicolet 仪器公司; TU-1810 紫外-可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 试验方法

1.3.1 可食膜的制备

制备浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜液^[11], 将用 60% 酒精溶解的不同浓度的肉桂醛分别加入其中混合均匀, 在 -0.8 MPa 下真空脱气约 5 h, 取 150 mL 膜液在 40 °C 下干燥成膜。

1.3.2 可食膜的性能测定

1.3.2.1 红外光谱 (FT-IR)

将膜置于 50 °C 恒温干燥箱中干燥 12 h, 剪碎研磨后采用 KBr 压片, 利用傅里叶变换红外光谱仪对其进行红外分析, 扫描范围为 4000~400 cm⁻¹。

1.3.2.2 膜的厚度 (FT)

用螺旋测微器在膜表面 4 角各取一点, 中央取一点, 共 5 个点测定膜厚, 取平均值, 膜厚用于计算膜的其他性能。

1.3.2.3 透光率 (T)

将膜剪成矩形试样(12 mm×40 mm), 贴于比色皿内侧(以空比色皿作对照), 在 560 nm 波长下用紫外-可见分光光度计测定透光率, 每个样品测定 3 次。

1.3.2.4 机械性能

按照国标《塑料薄膜拉伸性能试验方法》(GB/13022-1991), 用取样刀制取 15 mm×120 mm 矩形样品, 放入温度 23 °C, 相对湿度 50% 的恒温恒湿箱内平衡 12 h, 以智能电子拉力试验机测定可食膜的抗拉强度(TS)和断裂伸长率(E), 两夹头间试样长度为 80 mm, 试验速度为 200 mm/min, 每个样品测定 3 次。

1.3.2.5 水蒸气透过系数 (WVP)

按照国标《包装材料试验方法-透湿率》(GB/T16928-1997), 用透湿性测试仪测定, 每个样品测定 3 次。

1.3.2.6 氧气透过率 (OP)

按照国标《塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法-压差法》(GB/T1038-2000), 用气体透过性测试仪测定, 每个样品测定 3 次。

1.3.2.7 膜的抑菌试验

采用圆盘抑制法测定复合膜的抑菌性能。用微量移液管将 0.1 mL 菌浓度为 10⁵ CFU/mL 的大肠杆菌菌悬液导入营养琼脂培养基, 涂布均匀, 通风干燥 10 min, 将复合膜制成直径约 6 mm 的小圆片, 并置于平板培养基中央, 在 37 °C 下培养 24 h 和 48 h, 观察并测量抑菌直径。每个样品做 3 组平行试验。以不添加肉桂醛的复合膜为空白对照。

1.3.2.8 数据处理

使用 spss17.0 处理数据, 进行方差分析, 采用 origin7.5 作图, DPS 软件 Duncan 多重比较检验法进行显著性分析 (P<0.05)。

2 结果与讨论

2.1 对照试验

由于肉桂醛难溶于水, 易溶于醇、醚中, 本研究将肉桂醛用 60% 的酒精溶解, 但酒精作为一种有机溶剂本身就具有一定的抑菌性, 所以研究了酒精的添加对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜性能的影响, 结果如下表。表 1 中, A 组为浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜, B 组为添加酒精的浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜, C 组为

添加酒精的肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜。由表知, B 组的理化性质较 A 组并没有较大的改变, C 组膜厚大于 A 组及 B 组, 但差异并不显著, C 组抗拉强度、透光率、水蒸气透过系数、氧气透过率均高于 A 组及 B 组, 差异显著, C 组断裂伸长率低于 A 组及

B 组, 差异显著, 由此可知, 肉桂醛为改善复合膜理化性质的有效成分。B 组的抑菌圈直径大于 A 组, 差异显著, C 组的抑菌圈直径远远大于 A 组及 B 组, 且差异极显著, 说明肉桂醛相比酒精具有更强的抑菌效力。

表 1 不同复合膜理化性质及抗菌性能对比

Table 1 Comparison of physicochemical and antibacterial properties of different composite films

组次	膜厚 /mm	抗拉强度 /MPa	断裂伸长率 /%	透光率 /%	水蒸气透过系数 / 10^{-13} [g/(cm s Pa)]	氧气透过率 / 10^{-5} [cm ³ /(m ² d Pa)]	抑菌圈直径 /mm
A	0.11±0 ^a	14.5±0.22 ^a	33.7±6.43 ^b	60.64±0.03 ^a	1.35±0.01 ^a	1.47±0.03 ^a	0.00±0 ^c
B	0.11±0 ^a	14.79±0.47 ^a	36±5.01 ^b	59.75±0.03 ^b	1.37±0.02 ^a	1.52±0.01 ^a	4.34±0.43 ^b
C	0.07±0 ^a	11.28±1.45 ^b	46.5±1.17 ^a	57.66±0.03 ^c	1.15±0.01 ^b	1.25±0.01 ^b	15.1±1.34 ^a

注: A: 浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜; B: 添加酒精的浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜; C: 添加酒精的肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜。

2.2 红外光谱 (FT-IR)

添加肉桂醛前后的壳聚糖/浓缩乳清蛋白复合膜的红外光谱图见图 1。图 1(a)为浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜, 图 1(b)为添加肉桂醛后的肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜。在浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜中, 3420 cm⁻¹ 处的吸收峰属于 O-H 的伸缩振动, 1650 cm⁻¹ 的吸收峰属于 CH₂ 的 δ (O-H) 弯曲振动, 1410 cm⁻¹ 处的吸收峰属于甲基和亚甲基中 C-H 键的面内弯曲振动, 1080 cm⁻¹ 处的吸收峰属于 C-O 键的伸缩振动, 在图 1(b)中, O-H 的伸缩振动的吸收峰由 3420 cm⁻¹ 处向低波长数 3400 cm⁻¹ 处移动, 说明肉桂醛成分与浓缩乳清蛋白和壳聚糖大分子形成了氢键或共价键, 破坏了大分子中羟基和氨基形成的部分氢键, 从而占据大分子骨架中的部分官能团的位置, 影响了大分子共价键的振动强度, 即肉桂醛与浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜发生了一定的交联反应, 其他吸收峰的峰值也稍有变化, 但未出现新的峰, 说明肉桂醛与浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜有很好的相容性。

2.3 膜的厚度 (FT)

肉桂醛浓度对膜厚的影响见图 2。由图知, 膜厚随着肉桂醛浓度的增加而先增大后减小再增大。由于复合膜中成膜材料浓缩乳清蛋白和壳聚糖的质量分数是一定的, 影响膜厚的主要因素即为肉桂醛的浓度及膜的含水量^[12]。随着肉桂醛浓度的增大, 膜液中固形物含量的增多引起膜的厚度增加, 在肉桂醛浓度为 0.1% 时, 膜厚最大为 0.13 mm, 但肉桂醛做为脂类疏水性物质, 会引起膜本身含水量的降低, 当肉桂醛浓度高于 0.1% 时, 肉桂醛疏水性引起的膜水分减少占主导作用, 膜厚开始减小, 直至肉桂醛浓度为 0.4% 之后,

肉桂醛浓度的增加导致膜液中固形物的增多开始占主导作用, 并且过多的肉桂醛分子打乱了原有大分子链之间紧密的连接, 使膜的结构松散, 又导致膜厚增加。

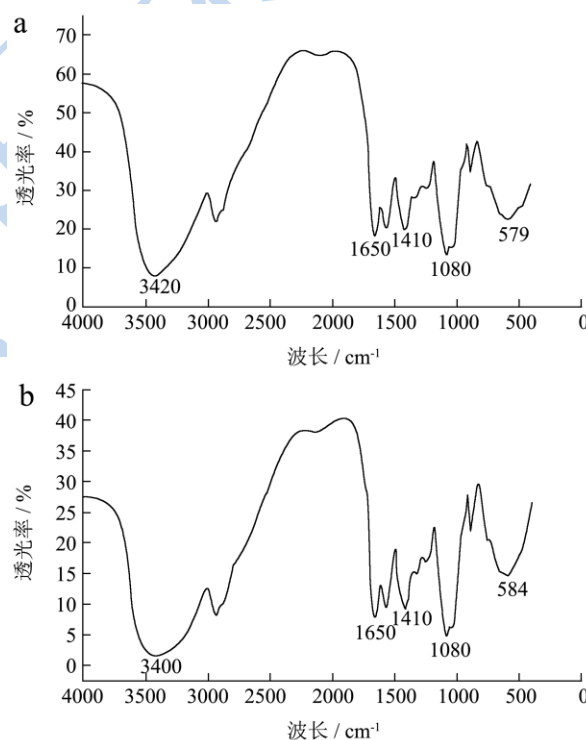


图 1 添加肉桂醛前后浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜红外光谱图

Fig.1 FT-IR spectra of the whey protein concentrate-chitosan films with and without the addition of cinnamaldehyde

注: a: 未添加肉桂醛; b: 添加肉桂醛。

2.4 透光率 (T)

肉桂醛浓度对膜透光率的影响见图 3。由图知, 随着肉桂醛浓度的增加, 膜的透光率略微减小, 但变化并不明显, 都在 56.40%~63.16% 之间。添加精油的膜透光率依赖于膜基体中精油的分布以及精油和大分

子成膜物质之间的相互作用,这导致了不同组分膜透光率的差异^[13]。浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜透光率较好,那么复合膜透光率的改变则由于肉桂醛的添加,即微小的油滴对光具有散射作用,导致膜的透光率略微减小,这也与 Hossein 等^[14]的研究结果一致。

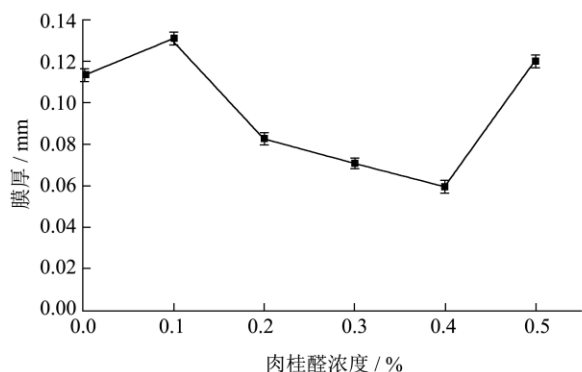


图2 肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜膜厚影响

Fig.2 Effect of cinnamaldehyde concentration on the film thickness of the whey protein concentrate-chitosan composite films

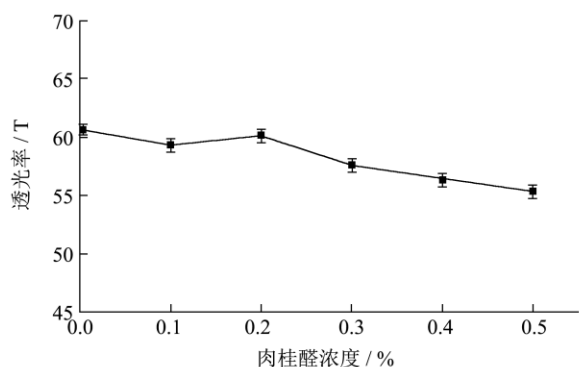


图3 肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜透光率影响

Fig.3 Effect of cinnamaldehyde concentration on the transmittance of the whey protein concentrate-chitosan composite films

2.5 机械性能

肉桂醛浓度对膜抗拉强度和断裂伸长率的影响见图4。由图知,浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜的抗拉强度最大,为14.5 MPa,随着肉桂醛浓度的增加,抗拉强度降低。水分子在膜中会与浓缩乳清蛋白分子和壳聚糖分子形成一定的水合物,稳定膜的结构,但是由于肉桂醛的疏水性,导致膜的含水量减少,从而减少了膜的无定形区,膜的抗拉强度降低,且肉桂醛小分子又破坏了浓缩乳清蛋白与壳聚糖大分子之间的链段结构以及大分子间的氢键作用,其与大分子形成交互作用,取代了大分子之间较强的交联作用,因此膜的抗拉强度减小。断裂伸长率随着肉桂醛浓度的增大而增加,肉桂醛浓度为0.5%时,复合膜断裂伸长率最大

达到57.5%,由于肉桂醛在常温下是液体状态,所以其在膜中以微小液滴形式存在,起到了一定的增塑剂的作用,从而提高了膜的延展性,因此断裂伸长率增加。

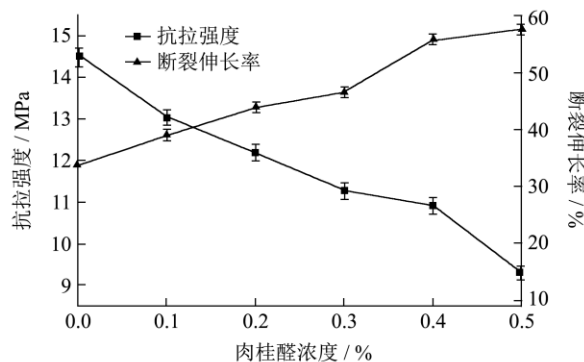


图4 肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜抗拉强度和断裂伸长率的影响

Fig.4 Effect of cinnamaldehyde concentration on the tensile strength and elongation at break of the whey protein concentrate-chitosan composite films

2.6 水蒸气透过系数 (WVP)

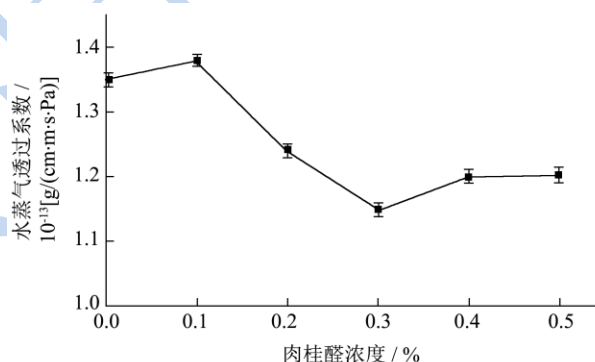


图5 肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜水蒸气透过系数的影响

Fig.5 Effect of cinnamaldehyde concentration on the water vapor permeability of the whey protein concentrate-chitosan composite films

肉桂醛浓度对膜水蒸气透过系数的影响见图5。由图知,随着肉桂醛浓度的增加,膜的水蒸气透过系数先增大再减小后增大。可食膜的水蒸气透过系数主要取决于膜的亲水性、水分子在膜中的扩散速度及膜内部分子链移动等^[15-16]。当添加少量的肉桂醛时,原有的浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜的大分子结构被破坏,导致膜的水蒸气透过系数增大,当肉桂醛浓度增大时,由于其脂类物质的疏水特性,它均匀的分布在大分子网状结构中,可以有效的阻止水分子的通过,从而水蒸气透过系数降低,在肉桂醛浓度为0.3%时,膜的水蒸气透过系数最小,为 $1.15 \times 10^{-13} g/(cm \cdot s \cdot Pa)$,

随着肉桂醛浓度的继续增大, 过多的肉桂醛对膜中大分子聚合力的削弱占主导作用, 从而减小了膜的致密度, 导致膜的水蒸气透过系数又增大。

2.7 氧气透过率 (OP)

肉桂醛浓度对膜氧气透过率的影响见图 6。由图知, 随着肉桂醛浓度的增加, 膜的氧气透率先增大后减小再增大, 但变化趋势不明显。一般情况下, 亲水性的生物聚合膜具有很好的阻氧性能^[17], 所以添加肉桂醛后, 使得膜的氧气透过率稍有增加, 但当肉桂醛浓度从 0.1%增大到 0.4%时, 由于肉桂醛小分子分散在浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜大分子网状结构中, 使得复合膜结构更为致密, 氧气不易透过, 所以氧气透过率减小, 至肉桂醛浓度为 0.4%时, 氧气透过率最低, 为 $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d Pa})$, 当肉桂醛浓度高于 0.4%时, 由于肉桂醛的挥发性, 导致膜在干燥过程中形成了微孔, 使得氧气透过率又开始增大。

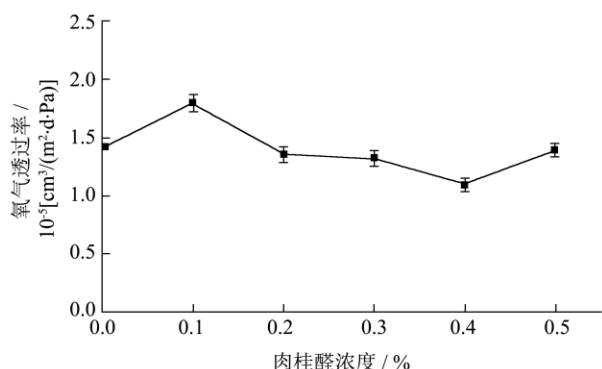


图 6 肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜氧气透过率的影响

Fig.6 Effect of cinnamaldehyde concentration on the oxygen permeability of the whey protein concentrate-chitosan composite films

2.8 膜的抑菌试验

肉桂醛浓度对复合膜抗菌性的影响见图 7。由图知, 选取未添加肉桂醛的浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜为对照组, 随着肉桂醛浓度的增大, 复合膜抑菌圈直径显著增大, 当肉桂醛浓度为 0.5%时, 24 h 时抑菌圈直径可达到 17.80 mm, 48 h 时抑菌圈直径为 11.95 mm, 说明肉桂醛起到了良好的抑菌作用, 这是因为肉桂醛中的醛基可与细菌中的蛋白以及酶作用, 破坏细菌正常的生理代谢, 起到抑菌或杀菌的作用, 但是添加过多的肉桂醛会对膜本身的外观形态产生一定的影响, 所以应在合理范围内控制肉桂醛的添加, 使其性能最高效的发挥。

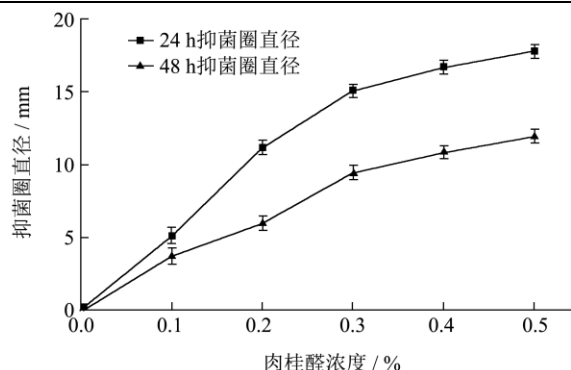


图 7 添加不同肉桂醛浓度的浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜对大肠杆菌的抑菌效果

Fig.7 Antibacterial effect of the whey protein concentrate-chitosan composite film incorporated with different cinnamaldehyde concentrations on *Escherichia coli*

3 结论

3.1 肉桂醛为改善肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜理化性质的有效成分且比酒精有更强的抑菌效力。

3.2 不同肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜的物理性质、机械性能、水蒸气透过系数、氧气透过率以及抗菌性能都有一定的影响。通过对膜进行傅里叶红外光谱分析可知, 添加肉桂醛的复合膜中 O-H 的伸缩振动吸收峰由 3420 cm^{-1} 处向低波长数 3400 cm^{-1} 处移动, 并且峰宽变宽, 说明肉桂醛成分与浓缩乳清蛋白和壳聚糖大分子形成了氢键或共价键, 即肉桂醛与浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜有很好的相容性。

3.3 当肉桂醛浓度为 0.3%时, 膜的水蒸气透过系数最小, 为 $1.15 \times 10^{-13} \text{ g}/(\text{cm s Pa})$; 随着肉桂醛浓度的增大, 膜的厚度和氧气透过率都呈现先增大后减小再增大的趋势, 在肉桂醛浓度为 0.4%时, 膜厚最小为 0.07 mm, 氧气透过率最小为 $1.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d Pa})$; 膜的透光率随着肉桂醛浓度的增加略微减小, 但变化并不明显, 都在 56.40%~63.16%之间; 浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜抗拉强度最大为 14.5 MPa, 当肉桂醛浓度为 0.5%时, 膜的断裂伸长率最大, 为 57.5%。随着肉桂醛浓度的增大, 膜的抑菌效力显著增大。本研究表明肉桂醛/浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] Sorrentino A, Gorrasi G, Vittoria V. Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications [J]. Trends in Food Science and Technology, 2007, 18(2): 84-95
- [2] Hernandez M, Krochta M. Thermoplastic processing of

- proteins for film formation-a review [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(2): 30-39
- [3] Bakkali F, Averbeck S, Averbeck D, et al. Biological effects of essential oils: a review [J]. *Food Chemical Toxicology*, 2008, 46(2): 446-475
- [4] Bauermann U, Greule M, Mosandl A. Authenticity assessment of essential oils-the key for product safety and traceability in the field of feed supplements [J]. *Zeitschrift Fur Arznei-& Gewurzpflanzen*, 2008, 13(3): 134-137
- [5] Atarés L, Bonilla J, Chiralt A. Characterization of sodium caseinate-based edible films incorporated with cinnamon or ginger essential oils [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 5(18): 1-10
- [6] Soliman K, Badea R. Effect of oil extracted from some medicinal plants on different mycotoxigenic fungi [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40(1): 1669-1675
- [7] Lambert R, Skandamis P, Coote P, et al. A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, 91(3): 453-462
- [8] 张彬,江娟.肉桂醛-大豆分离蛋白可食膜的抑菌及其对冷鲜猪肉的保鲜[J].*食品科学*,2011,32(S):106-112
ZHANG Bin, JIANG Juan. Antimicrobial and preservation of chilled pork of cinnamaldehyde-soy protein isolate edible films [J]. *Food Science*, 2011, 32(S): 106-112
- [9] 谢帆.肉桂醛微胶囊制备及其释放规律研究[D].广州:华南理工大学,2009
XIE Fan. The microencapsulation of cinnamaldehyde and its performance in different condition [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009
- [10] Franceline A, Nilda S, Cristiane L, et al. Conservation of bakery products through cinnamaldehyde antimicrobial films [J]. *Packaging Technology and Science*, 2014, 27(4): 293-302
- [11] 隋思瑶,张宁,王亚静,等.超声波微波协同改性乳清蛋白/壳聚糖可食膜工艺优化[J].*农业工程学报*,2014,30(10):254-261
SUI Si-yao, ZHANG Ning, WANG Ya-jing, et al. Process optimization for whey protein concentrate -chitosan edible films combined with ultrasonic/microwave assisting treatment [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 254-261
- [12] 张赞彬,王景文,王一非,等. Florida橘油-壳聚糖复合膜的制备及表征[J].*现代食品科技*,2014,30(2):147-152
ZHANG Yun-bin, WANG Jing-wen, WANG Yi-fei, et al. Preparation and characterization of florida mandarin oil-chitosan composite films [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(2): 147-152
- [13] Mehraj A, Soottawat B, Thummanoon P, et al. Physico-mechanical and antimicrobial properties of gelatin film from the skin of unicorn leatherjacket incorporated with essential oils [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(1): 189-199
- [14] Hossein M, Razavi H, Mousavi 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
- [15] Jimenez A, Fabra J, Talens P, et al. Effect of re-crystallization on tensile, optical and water vapour barrier of corn starch films containing fatty acids [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(1): 303-310
- [16] Nassan A, Norziah H. Starch-gelatin edible films: water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(1): 108-117
- [17] Embuscado E, Huber C. Edible films and coatings for food applications [M]. New York: Springer Science and Business Media, LLC, 2009