

pH 敏感型紫番茄花青素在壳聚糖膜制备中的应用研究

李增辉, 李亚娜, 王晓, 吴凯旋
(武汉轻工大学 机械工程学院, 武汉 430023)

摘要: **目的** 研究紫番茄花青素 (PTA) 质量分数对复合膜性能的影响, 并测试复合膜对不同 pH 值的颜色响应。**方法** 以壳聚糖 (CS) 为基材, PTA 为添加剂, 采用溶液共混法制备 PTA 质量分数为 0、1%、3%、5% (PTA 相对于 CS 的百分含量) 的复合膜。研究 PTA 质量分数对复合膜接触角、拉伸强度、水蒸气透过率的影响, 并通过复合膜对不同 pH 值的颜色响应考察其 pH 敏感性。**结果** PTA 在酸性环境下, 呈现紫红色; 在中性环境下, 呈现淡紫色透明状, 接近无色透明状; 在碱性环境下, 呈现橙黄色。通过对不同质量比 ($m_{CS} : m_{PTA}$) 的 PTA/CS 复合膜的性能测试, 发现 PTA 的加入降低了复合膜的亲水性, 复合膜的拉伸强度和断裂伸长率明显增大。高浓度的 PTA/CS 复合膜在酸性条件下, 颜色变化不太明显, 在碱性条件下, 复合膜的颜色明显变成了黄色。**结论** 加入一定量的 PTA 能够改善膜的力学性能, 增强膜的疏水性, 提高了膜的 pH 敏感性。鉴于 PTA/CS 复合膜具有很多优良的性能, 可为制备高性能壳聚糖基食品包装材料提供一定的理论依据。

关键词: 壳聚糖; 紫番茄花青素; 复合膜; pH 敏感性

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)15-0160-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.15.018

Application of pH-sensitive Purple Tomato Anthocyanin in Preparation of Chitosan Film

LI Zeng-hui, LI Ya-na, WANG Xiao, WU Kai-xuan

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of mass fractions of purple tomato anthocyanin (PTA) on the performance of composite films and to test the color response of composite films to different pH values. With chitosan (CS) as the base material and PTA as the additive, composite films with PTA mass fractions of 0, 1%, 3% and 5% (the percentage of PTA relative to CS) were prepared by solution blending method. The effects of PTA mass fractions on the contact angle, tensile strength and water vapor transmission rate of the composite films were investigated, and the pH sensitivity of the composite films was examined by the color response to different pH values. PTA showed purplish red color in acidic environment and became lavender transparent and was close to colorless transparent in neutral environment, and showed orange-yellow color in alkaline environment. The performance of PTA/CS composite films with different mass ratios ($m_{CS} : m_{PTA}$) was tested, and it was found that the addition of PTA reduced the hydrophilicity of the composite films, but the tensile strength and elongation at break increased significantly. The color change of the PTA/CS composite films with

收稿日期: 2022-01-04

作者简介: 李增辉 (1996—), 男, 武汉轻工大学硕士生, 主要研究方向为智能指示标签。

通信作者: 李亚娜 (1980—), 女, 博士, 武汉轻工大学教授, 主要研究方向为食品保鲜膜以及活性包装材料。

high concentration was less obvious under acidic conditions, and the color of the composite films became yellow significantly under alkaline conditions. The addition of a certain amount of PTA can improve the mechanical properties of the films and enhance the hydrophobicity. If the pH sensitivity of PTA/CS composite films can be improved, combined with the fact that PTA/CS composite films have many excellent properties, it can provide a certain theoretical basis for the preparation of high-performance chitosan-based food packaging materials.

KEY WORDS: chitosan; purple tomato anthocyanin; composite films; pH sensitivity

传统的食品包装材料一般为纸、塑料、金属、玻璃、陶瓷等,但是这些材料存在不易降解、成本较高的缺点,且容易造成环境污染。为了更好地保证食品安全,开发安全环保的食品包装材料成为现在包装领域研究的重要方向。

食品在储存的过程中,微生物的滋生致使食品腐败变质,微生物生长代谢产物会改变包装内部环境的 pH 值,通过 pH 敏感型指示剂检测包装内部环境的变化,从而判断食品质量的新鲜度。这种指示剂型的包装材料的产生,能够更好地满足人们的需求^[1]。

目前,智能包装中的新鲜度指示剂采用的大多为溴百里酚蓝、甲基红等化学染色剂,而这些化学合成的试剂具有一定的毒性,容易造成食品安全问题,会危害人们的身体健康^[2]。壳聚糖是天然存在的一种碱性多糖,具有生物降解性、良好的生物相容性、无毒性且易于成膜等优点,是一种新型的安全环保的材料^[3]。壳聚糖获取的成本较低,且性能优良,因此,壳聚糖常被用作新型复合材料的成膜基材。花青素是自然界中一种广泛存在的水溶性天然色素,纯天然无毒害,能够随着 pH 变化呈现不同的颜色变化,因此,以花青素作为食品包装中的指示剂成为人们研究的热点^[4-5]。目前,有研究利用紫甘薯^[6]、蓝莓^[7]、黑枸杞^[8]等植物提取的花青素作为食品包装的指示剂,结果表明花青素来源不同,对复合膜的功能和物理性质有很大影响^[9]。在紫色番茄中不仅含有普通番茄中的营养物质,而且还富含具有抗氧化性能的花青素和其他挥发性等物质^[10],因此,紫番茄花青素在食品包装中有很大的发展潜力。实验主将要 PTA 分散到壳聚糖溶液中,制备 PTA/CS 复合膜,并测试其物理性能和透湿率,以及在不同 pH 环境下的颜色反应,旨在通过添加 PTA 改善壳聚糖基的包装膜的综合性能。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:壳聚糖(CS),脱乙酰度 $\geq 90\%$,国药集团化学试剂有限公司;紫番茄花青素(PTA),分析纯,浙江拜森生物科技有限公司;冰乙酸,分析纯,天津市天力化学试剂有限公司;1,1-二苯基-2-

三硝基苯肼(DPPH),上海麦克林生化科技有限公司。

主要仪器:S21-1 恒温磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;电热恒温鼓风干燥机,上海新苗医疗器械制造有限公司;DZF-6020 型真空干燥箱,上海新苗医疗器械制造有限公司;SHA-C 水浴恒温振荡器,金坛市科析仪器有限公司;JCY-3 接触角测定仪,上海方瑞仪器有限公司;MB120 水分测定仪,奥豪斯仪器(常州)有限公司;色度仪,杭州新叶光电公司;W3/031X 水蒸气透过率测试仪,济南兰光机电技术有限公司;电子万能试验机,深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.2 试样制备

先配制体积分数为 1% 的冰乙酸溶液,将 1 g 壳聚糖与 100 mL 质量分数为 1% 的乙酸溶液混合,搅拌至完全溶解,制备质量浓度为 10 g/L 的壳聚糖溶液。在搅拌后的壳聚糖溶液中加入一定量的 PTA,磁力搅拌 4 h,使溶液充分混合后过滤并静置 24 h,然后放入恒温振荡器中 30 min 去除气泡,得到质量分数分别为 0%、1%、3%、5% (PTA 与 CS 的质量之比) 的 PTA/CS 溶液。将配制好的混合溶液 80 mL 倒入直径为 150 mm 的塑料培养皿中,并放入真空干燥箱常温下真空干燥 1 h,随后放入 45 °C 的电热恒温鼓风干燥箱中烘干 24 h,最终得到不同浓度的 PTA/CS 复合膜,见图 1。

1.3 性能测试

1.3.1 接触角

选取试样表面平整、厚度均匀的 PTA/CS 复合膜裁剪成 50 mm×15 mm 的大小,用固体胶将裁剪后的复合薄膜平整的黏合在载玻片上,然后利用接触角测定仪测量膜的表面接触角,每种浓度的紫番茄花青素/壳聚糖复合膜分别测量 6 次接触角,然后取平均值进行分析。

1.3.2 力学性能

参照 GB/T 1040.3—2006《塑料 拉伸性能的测定 第 3 部分:薄膜和薄片的试验条件》^[11],将复合薄膜裁剪为 80 mm×15 mm 的长条状,用厚度仪测量 4 次试样的厚度并计算平均值,单位为 mm。利用电子万能试验机测定膜的拉伸强度和断裂伸长率,每种试样测定 6 组数据,然后取平均值。

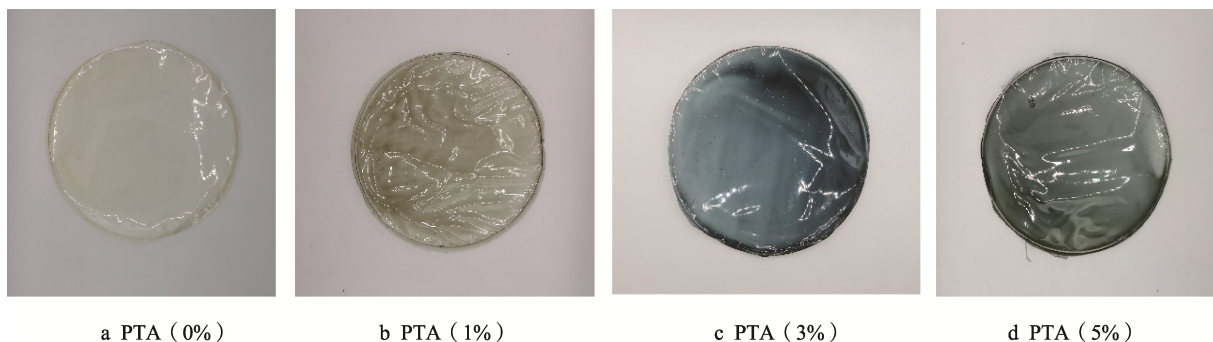


图1 PTA/CS 复合膜
Fig.1 PTA/chitosan composite film

1.3.3 水蒸气透过率

参照 GB/T 1037—1988《塑料薄膜和片材透水蒸气性试验方法 杯式法》，取无污渍、针孔、折痕、褶皱的复合薄膜，将薄膜样品裁剪成直径为 74 mm 的圆形，然后置于温度为 38 °C 和相对湿度为 90% 的恒温恒湿箱内储存 24 h 后，用水蒸气透过率测试仪测定每组试样的水蒸气透过率，每组试样测试 3 个样品，然后取平均值。

1.3.4 pH 敏感性

1.3.4.1 番茄花青素在不同 pH 值下的显色反应

按一定的比例将氢氧化钠和盐酸配置成 pH 值为 2~11 的缓冲液，然后在取 10 mL 不同 pH 值的溶液于玻璃器皿中，加入 2 mg 番茄花青素，观察溶液颜色变化。

1.3.4.2 复合膜在不同 pH 值下的显色反应

将膜裁成 20 mm×20 mm，分别在玻璃培养皿中倒入 pH 值为 2~11 的缓冲液，然后把膜浸入缓冲液中，在 3 min 后用手机拍下其外观，并使用色度计进行测量。

2 结果与分析

2.1 复合膜的表面接触角

薄膜表面的水接触角大小反映了材料的亲水性和疏水性，接触角越大，疏水性越好；接触角越小，亲水性越好^[12]。花青素是一种水溶性的天然色素，它本身含糖苷基和一定的羟基基团，能够与壳聚糖发生一定的反应^[13]。PTA/壳聚糖复合膜的接触角随 PTA 量分数的变化见图 2。由图 2 可见，在 PTA 质量分数从 0% 增加到 1% 时，接触角明显减小，从 74.4° 降低到 62.4°，降低了 16.1%，可能是由于 PTA 中含有游离的羟基，本身具有一定的亲水性，在花青素质量分数为 1% 时复合膜的亲水性增强。当 PTA 的质量分数从 1% 增加到 5% 的过程中，看到接触角明显变大，从 62.4° 增加到 85.9°，增加了 37.7%。这可能是由于随着花青素质量分数的增加，CS 与 PTA 分子间

存在的氢键导致复合膜的交联度降低，使得复合膜的疏水性增强^[14]。此外，花青素本身含有甲氧基官能团，也具有一定的疏水性能^[15]。

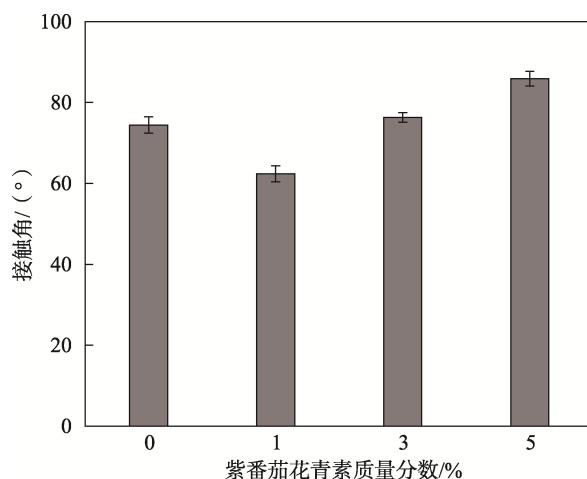


图2 不同质量分数 PTA/壳聚糖复合薄膜表面接触角
Fig.2 Surface contact angle of PTA/chitosan composite films with different concentrations

2.2 复合膜的力学性能

复合膜的拉伸强度和断裂伸长率反应了复合膜的强度和塑性^[14]。PTA/壳聚糖复合膜的拉伸强度和断裂伸长率结果见图 3。从图 3 可以看出，复合膜的拉伸强度和断裂伸长率整体呈现上升趋势。紫番茄花青素质量分数从 1% 增加 5% 的过程中，可以看到拉伸强度从 38.5 MPa 增加到 56.2 MPa，提高了 45.9%，同时断裂伸长率提高了 78.4%。可能是由于加入 PTA 后，壳聚糖中的羟基与花青素中的氢键相结合，使得分子间的相互作用增强，复合膜的力学性能得到提升，增强了复合膜的强度和塑性。

2.3 复合膜的水蒸气透过率

从图 4 可以看出，随着加入 PTA 浓度的提高，复合膜的水蒸气透过率也逐渐增高，从 844.6g/(m²·24 h) 升高到 1 107.3g/(m²·24 h)，提高了 31%。这可能是由于 PTA 中含有大量的亲水性酚羟基基团，这些亲水

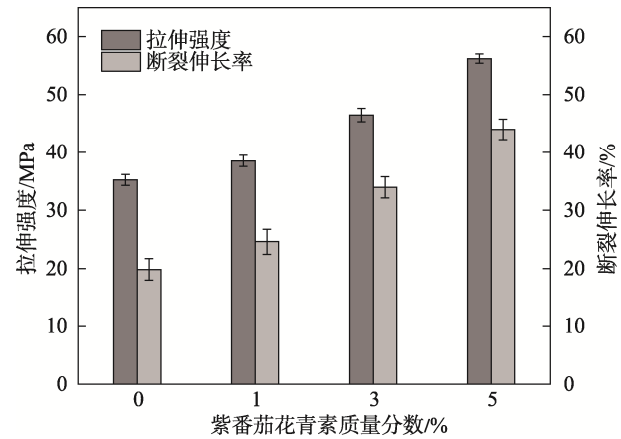


图 3 不同质量分数 PTA /壳聚糖复合薄膜的拉伸强度和断裂伸长率

Fig.3 Tensile strength and elongation a break of PTA/chitosan composite films with different concentrations

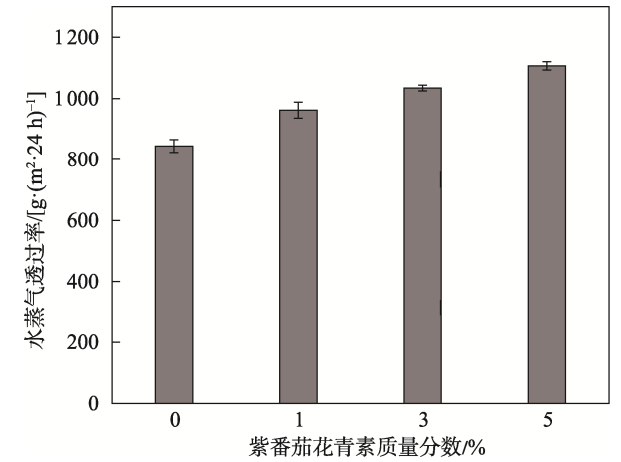


图 4 不同质量分数 PTA/壳聚糖复合薄膜的水蒸气透过率

Fig.4 Water vapor transmittance of PTA/chitosan composite films with different concentrations

性酚羟基基团与壳聚糖分子结合形成游离的氢键,或者是壳聚糖与 PTA 混合后形成了极性的聚合物,导致水蒸气分子与聚合物基团出现很强的相互作用,使得水分子更易通过复合膜。

2.4 复合膜的 pH 敏感性测试

2.4.1 紫番茄花青素在不同 pH 值下的显色反应

由图 5 可见,PTA 在不同 pH 值的缓冲液中呈现出不同的颜色,表明 PTA 具有很好的 pH 响应性。PTA 在酸性条件下呈现紫红色,随着 pH 值升高,颜色逐渐变浅;在中性条件下,溶液呈淡紫色或接近无色透明;在碱性条件下,溶液由蓝色到绿色再到黄色。当 pH 值为 2 时,由于花青素主要以黄盐阳离子^[16]形式存在,溶液呈紫红色;当 pH 值为 3~6 时,有无色查耳酮和假碱物质生成,溶液呈浅红色;当 pH 值为 7~9 时,花青素主要以蓝色醌型碱^[17]为主,溶液由无色向蓝色转变,呈淡蓝色;当 pH 值大于 9 时,花青素在碱性条件下,会有酚盐生成,溶液逐渐由淡蓝色向橙黄色转变。

2.4.2 复合膜在不同 pH 值下的显色反应

由图 6 可见,壳聚糖膜对 pH 值的变化不具有敏感性,当复合膜中加入 PTA 后,可以明显地看到复合膜颜色的变化。从图 6 中可以看出,PTA/壳聚糖复合膜在碱性条件下,颜色变化较明显^[18]。在酸性条件下,当 PTA 质量分数为 1%时,复合膜呈现无色,可能是由于花青素质量分数较低,并且发生了水解反应,有甲醇假碱生成;当 PTA 质量分数为 3%和 5%时,可以看到复合膜颜色变化较小,这可能是由于壳聚糖是一种碱性多糖,使得花青素分子在 pH 缓冲液中失去氢离子,生成蓝色醌型碱。随着 pH 值的升高,复合膜逐渐由淡蓝色变成最后的黄色,这可能是因为 PTA 在强碱条件下,状态极不稳定,容易与壳聚糖发生反应,使得游离的羟基与氢离子结合,使花青素被降解。

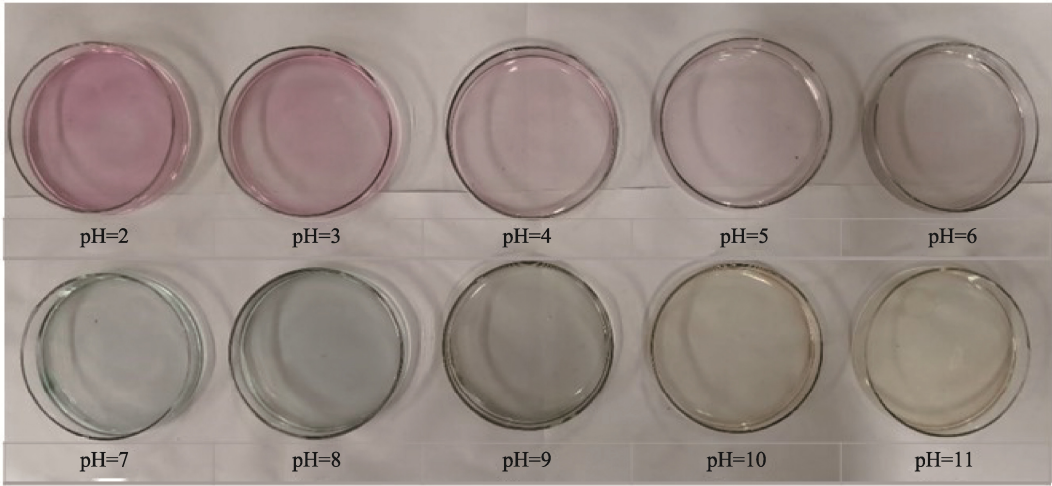


图 5 PTA 在不同 pH 值下的显色反应
Fig.5 Color reaction of PTA at different pH values

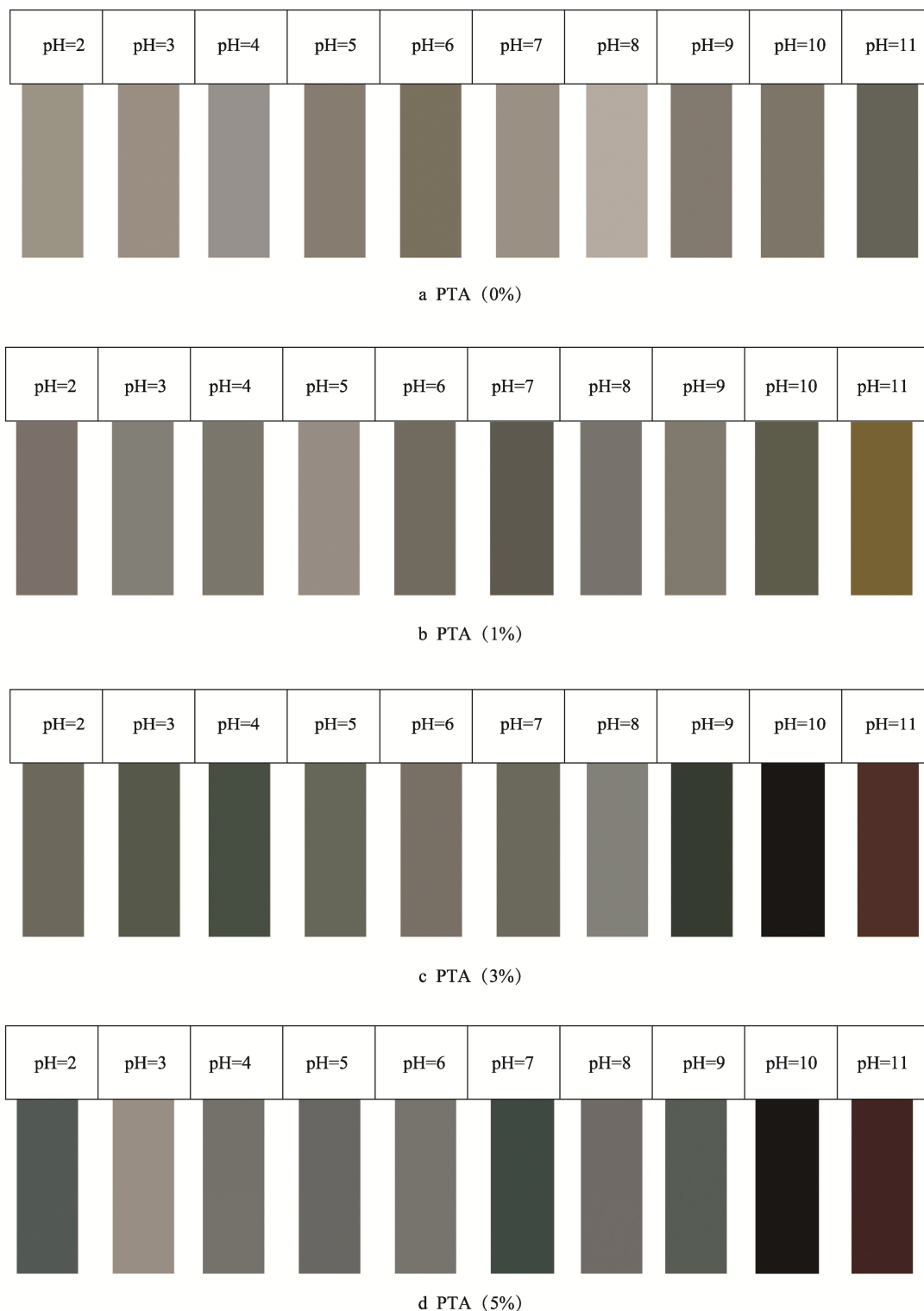


图 6 不同质量分数 PTA/壳聚糖复合薄膜在不同 pH 下的颜色变化
Fig.6 Color changes of PTA/chitosan composite films with different concentrations at different pH values

通过肉眼观察到的颜色变化与表 1 中参数 L 、 a 、 b 值的变化一致,在不同质量分数的 PTA/壳聚糖薄膜中,亮度值 L 都具有很明显的变化趋势,这表明随着 pH 值的逐渐升高产生了比对照薄膜更暗的薄膜。参数 a 和 b 的变化证实了视觉颜色会随着 pH 值变化而

变化。PTA/壳聚糖复合薄膜在 pH 值从 2 增加到 11 的缓冲液中, a 、 b 值都有一定增大,在碱性条件下, b 值的增大效果更显著,使得复合膜的颜色趋于黄色。薄膜中 pH 值随视觉变化的影响较小,这可能是因为花青素存在的多种矿物螯合剂^[19](如铁和铜)的原因。

表 1 pH 为 2~11 条件下 PTA/壳聚糖复合薄膜的色度值
Tab.1 Chroma value of PTA/chitosan composite films at pH values of 2-11

花青素质量 分数/%	pH 值	色度变化		
		<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
0		46.7±0.3 ^a	-0.5±0.2 ^a	-0.5±0.3 ^c
	2.0	33.3±1.9 ^a	-0.7±3.2 ^a	-0.7±4.0 ^a
	3.0	29.8±5.2 ^b	-0.8±1.2 ^a	-2.2±2.1 ^a
	4.0	36.6±2.5 ^a	-0.1±0.8 ^a	-2.0±1.0 ^a
	5.0	31.8±1.7 ^b	-1.0±1.4 ^a	-2.0±3.7 ^a
	6.0	31.3±1.8 ^b	-1.4±1.9 ^a	0.0±3.7 ^a
	7.0	32.4±1.7 ^b	-1.0±1.5 ^a	0.1±3.7 ^a
	8.0	30.2±1.1 ^b	-1.5±1.8 ^a	0.8±1.2 ^a
	9.0	29.1±2.1 ^c	-1.8±2.7 ^a	-0.2±2.1 ^a
	10.0	32.7±2.6 ^b	-0.7±0.9 ^a	0.9±1.2 ^a
	11.0	27.9±1.3 ^d	-0.9±0.7 ^a	-0.6±2.7 ^a
1		39.5±0.8 ^b	-0.7±0.7 ^a	3.6±0.3 ^a
	2.0	35.2±1.6 ^a	-0.1±0.3 ^a	-0.1±0.6 ^b
	3.0	35.1±0.5 ^a	-0.5±0.3 ^b	-1.1±0.8 ^b
	4.0	31.8±1.5 ^c	0.3±0.6 ^a	-2.0±1.7 ^c
	5.0	29.0±2.0 ^d	-0.1±0.3 ^a	1.1±2.4 ^b
	6.0	36.5±2.1 ^a	0.5±0.8 ^a	-1.8±1.3 ^c
	7.0	30.8±1.4 ^c	0.4±0.8 ^a	0.1±4.5 ^b
	8.0	30.6±1.6 ^c	0.0±0.8 ^a	-0.9±0.9 ^b
	9.0	36.9±1.1 ^a	0.7±1.5 ^a	-0.3±2.3 ^b
	10.0	34.5±0.7 ^b	-0.3±0.5 ^a	1.0±0.6 ^b
	11.0	29.3±1.0 ^d	-0.4±0.6 ^a	10.2±1.7 ^b
3		32.6±0.8 ^c	-1.9±0.5 ^b	3.4±0.5 ^a
	2.0	30.5±2.5 ^a	-0.7±1.3 ^b	-1.3±1.3 ^b
	3.0	26.8±2.4 ^b	-1.2±1.7 ^b	-2.7±2.5 ^b
	4.0	30.3±2.1 ^a	0.7±1.5 ^b	-5.4±3.0 ^b
	5.0	24.8±2.2 ^c	0.7±1.3 ^a	-2.7±3.7 ^b
	6.0	28.7±1.8 ^a	-0.6±0.9 ^b	-0.6±0.8 ^b
	7.0	26.2±1.7 ^b	-0.9±1.1 ^b	0.2±3.5 ^b
	8.0	28.9±2.0 ^a	0.3±5.0 ^b	-0.3±4.6 ^b
	9.0	20.9±1.2 ^e	-1.5±1.2 ^b	1.5±2.9 ^b
	10.0	22.1±2.4 ^d	1.3±1.8 ^a	-4.2±4.3 ^b
	11.0	24.9±2.2 ^c	3.6±1.8 ^a	24.9±13.0 ^a
5	空白	26.5±2.0 ^d	-3.3±0.3 ^c	0.6±0.1 ^b
	2.0	23.0±2.3 ^d	-2.8±0.9 ^d	-1.4±0.6 ^b
	3.0	20.5±1.1 ^d	-3.0±0.6 ^c	-1.0±0.7 ^b
	4.0	36.1±0.4 ^b	-1.1±0.2 ^b	-2.5±0.4 ^d
	5.0	35.2±1.3 ^b	-0.7±0.2 ^b	-1.8±0.1 ^c
	6.0	42.2±0.7 ^a	-1.0±0.2 ^b	-2.5±0.1 ^d
	7.0	27.0±5.2 ^c	-2.1±2.2 ^c	-1.3±1.9 ^b
	8.0	33.6±1.9 ^b	-1.7±0.5 ^b	-1.3±0.5 ^b
	9.0	35.7±1.6 ^b	-2.0±0.4 ^c	-1.0±0.5 ^b
	10.0	14.7±1.7 ^e	-0.7±0.3 ^b	-0.1±1.2 ^b
	11.0	20.0±0.5 ^d	7.8±0.8 ^a	8.0±1.3 ^a

3 结语

番茄花青素可以显著提高壳聚糖基膜的拉伸性能、疏水性能和水蒸气透过性能。当壳聚糖与 PTA 的质量比为 100:5 时,所制得的复合膜具有很好的力学性能和疏水性,此时复合膜的接触角为 85.9°,疏水性最强,拉伸强度为 56.2 MPa,断裂伸长率为 43.97%,水蒸气透过量为 g/(m²·24 h)。该复合膜的拉伸强度、断裂伸长率和水蒸气透过率随着番茄花青素质量分数的增大而增大,说明 PTA 的加入能够提高复合膜的疏水性,且能够增强复合膜的强度和塑性。

通过实验发现 PTA 含量对 pH 的敏感性影响很大,壳聚糖与 PTA 混合后制得的复合膜随着 pH 值的增大,亮度 *L* 明显降低,*a* 和 *b* 值变大,这说明 PTA/CS 复合膜能够对 pH 值的变化产生一定的颜色反应。综上所述,PTA 和壳聚糖可以制备成一种具有 pH 敏感性较好且力学性能较好的包装材料。

参考文献:

[1] 许文才,付亚波,李东立,等. 食品活性包装与智能标签的研究及应用进展[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 1-10.

XU Wen-cai, FU Ya-bo, LI Dong-li, et al. Research and Application Progress of Food Active Packaging and Smart Labels[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 1-10.

[2] 贾代涛,卢立新,潘嘹,等. 改性花青素涂覆聚丙烯新鲜度指示膜的制备与研究[J]. 功能材料, 2019, 50(6): 6211-6215.

JIA Dai-tao, LU Li-xin, PAN Liao, et al. Preparation and Study of Modified Roselle Anthocyanin Coated Polypropylene Freshness Indicator Film[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(6): 6211-6215.

[3] 张钊瀚,马帅,卢鑫,等. 壳聚糖-氧化石墨烯/热塑性聚氨酯复合材料的原位溶液聚合及性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2726-2734.

ZHANG Zhao-yan, MA Shuai, LU Xin, et al. In-Situ Solution Polymerization and Properties of Chitosan-Graphene Oxide/Thermoplastic Polyurethane Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(11): 2726-2734.

[4] 贾惜文,王浩,曹传爱,等. 颜色指示型智能包装监测生鲜肉新鲜度的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(6): 318-324.

JIA Xi-wen, WANG Hao, CAO Chuan-ai, et al. Research Advances in Application of Color Indicator Intelligent Packaging for Monitoring Freshness of Raw Meat[J]. Science and Technology of Food Industry,

- 2020, 41(6): 318-324.
- [5] 卢立新, 贾代涛, 潘嘹. 基于改性玫瑰茄花青素的新鲜度指示膜研制及其在鲳鱼包装中的应用[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 1-6.
- LU Li-xin, JIA Dai-tao, PAN Liao. Development of Freshness Indicator Film Based on Modified Roselle Anthocyanin and Its Application in Catfish Packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 1-6.
- [6] LI Yuan, YING Yu-bin, ZHOU Ya-qi, et al. A PH-Indicating Intelligent Packaging Composed of Chitosan-Purple Potato Extractions Strength by Surface-Deacetylated Chitin Nanofibers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 127: 376-384.
- [7] 孔璐, 刘晓颖, 郭丽, 等. 蓝莓花青素在食品抗氧化保鲜膜中的应用[J]. 农产品加工, 2017(18): 66-68.
- KONG Lu, LIU Xiao-ying, GUO Li, et al. Application of Blueberry Anthocyanins in Antioxidant Film for Food Preservative[J]. Farm Products Processing, 2017(18): 66-68.
- [8] 原红霞, 侯倩宜, 杜姗, 等. 静乐黑枸杞花青素的纯化及其抗氧化特性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 173-178.
- YUAN Hong-xia, HOU Qian-yi, DU Shan, et al. Purification and Antioxidant Properties of Anthocyanins from Jingle Lycium Ruthenicum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 173-178.
- [9] BHARGAVA N, SHARANAGAT V, MOR R. Active and Intelligent Biodegradable Packaging Films Using Food and Food Waste-Derived Bioactive Compounds: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 385-401.
- [10] 张艳晖, 刘娜, 朱为民, 等. 紫色番茄花青素提取条件筛选及稳定性分析[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(1): 88-92.
- ZHANG Yan-hui, LIU Na, ZHU Wei-min, et al. Anthocyanin Extraction Conditions Screening and Stability Analysis of Purple Tomato[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(1): 88-92.
- [11] GB/T 1040.3—2006, 塑料拉伸性能的测定第 3 部分: 薄膜和薄片的试验条件[S].
- GB/T 1040.3—2006, Plastics-Determination of Tensile Properties-Part 3: Test Conditions for Films and Sheets[S].
- [12] HOU J, YAN X. Preparation of Chitosan-SiO₂ Nanoparticles by Ultrasonic Treatment and Its Effect on the Properties of Starch Film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 271-278.
- [13] GUTIÉRREZ T J, GONZÁLEZ G. Effects of Exposure to Pulsed Light on Surface and Structural Properties of Edible Films Made from Cassava and Taro Starch[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(11): 1812-1824.
- [14] 邹小波, 王圣, 石吉勇, 等. 天然花青素提取物与壳聚糖明胶复合膜的制备和表征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 294-300.
- ZOU Xiao-bo, WANG Sheng, SHI Ji-yong, et al. Preparation and Characterization of Chitosan/Gelatin Composite Films Incorporated with Four Natural Pigments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 294-300.
- [15] 张莉, 陈蕴智, 滕玉红, 等. 壳聚糖-原花青素高抗氧化抑菌薄膜的研究[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 103-109.
- ZHANG Li, CHEN Yun-zhi, TENG Yu-hong, et al. Chitosan-Procyanidine Antibacterial Film with High Antioxidant Activity[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 103-109.
- [16] 孙理, 李亦欣, 纪祥月, 等. 花青素-明胶/聚乙烯醇-淀粉复合膜制备与表征[J]. 包装工程, 2021, 42(23): 109-115.
- SUN Li, LI Yi-xin, JI Xiang-yue, et al. Preparation and Characterization of Anthocyanin-Gelatin/Polyvinyl-Alcohol-Atarch Bilayer Composite Film[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(23): 109-115.
- [17] LI Y, WU K, WANG B, et al. Colorimetric Indicator Based on Purple Tomato Anthocyanins and Chitosan for Application in Intelligent Packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 174: 370-376.
- [18] 蒋光阳, 肖力源, 王章英, 等. 不同基材复配紫薯花青素制备智能指示膜及其应用[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 267-273.
- JIANG Guang-yang, XIAO Li-yuan, WANG Zhang-ying, et al. Development and Application of Intelligent Indicator Films Using Blended Film-Forming Solutions Combined with Purple Sweet Potato Anthocyanins[J]. Food Science, 2019, 40(13): 267-273.
- [19] SINELA A, RAWAT N, MERTZ C, et al. Anthocyanins Degradation during Storage of Hibiscus Sabdariffa Extract and Evolution of Its Degradation Products[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 234-241.