壳聚糖/花青素复合薄膜的制备及鱼肉新鲜度监测

姚乐，王诗意，周斐，郑为贤，高宝善，李中波，郑家辉
（安徽农业大学 轻纺工程与艺术学院，合肥 230036）

摘要：目的 研发一种指示效果快速准确且无毒无害的指示薄膜，这种可视化食品新鲜度指示包装可以让消费者更加便利地观察食品的新鲜度情况。**方法** 以具有生物降解性能的壳聚糖为成膜基材，以甘油为增塑剂，通过添加不同质量分数的花青素天然色素粉末作为指示剂，基于流延法制备具有酸碱指示作用的复合薄膜。通过改变薄膜中花青素的质量分数来调控指示薄膜在不同 pH 溶液及酸碱气氛中的显色性能。**结果** 当花青素粉末的质量分数为 0.3%时，薄膜在 pH=1.68~12.45 溶液中颜色的变化最为明显，颜色由粉红色变为棕黄色；在盐酸气氛中则呈现蓝紫色，在氨水气氛中呈现棕黄色。将制备的指示薄膜置于装有新鲜鱼肉的玻璃瓶中，根据鱼肉的腐烂变质情况，薄膜能很快地发生变色反应。**结论** 鱼肉释放的某种碱性物质会促使花青素分子结构发生变化，根据鱼肉的腐烂变质情况，薄膜能很快地发生变色反应，可以实现鱼肉新鲜度的实时可视化监测。

关键词：食品新鲜度；指示包装；花青素；壳聚糖
中图分类号：TS206.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2022)09-0083-09
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.011

Preparation of Chitosan/Anthocyanin Composite Film for Monitoring of Fish Freshness

YAO Le, *WANG Shi-yi*, *ZHOU Fei*, *ZHENG Wei-xian*, *GAO Bao-shan*, *LI Zhong-bo*, *ZHENG Jia-hui*

(College of Light Textile Engineering and Art, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

ABSTRACT: This paper aims to develop a fast, accurate, non-toxic and harmless indicating film as a kind of visual food freshness indicating packaging that can make it easier for consumers to observe the freshness of food. In this paper, the biodegradable chitosan/anthocyanin composite film was prepared based on the casting method, in which the anthocyanin acting as the film substrate, glycerin acting as the plasticizer, and the anthocyanin acting as the indicator. The color performance of the film in different pH solutions and acid/base atmospheres could be regulated by changing the mass fraction of anthocyanins. The experimental results showed that when the mass fraction of anthocyanin was 0.3%, the color of the film changed as the most obvious one from pink to yellowish-brown in the pH solution of 1.68-12.45. Besides, in the atmosphere of hydrochloric acid, it appeared blue-purple, and in the atmosphere of ammonia, it appeared brownish yellow. The prepared indicator film was placed in a glass bottle containing fresh fish, and the film could change the color quickly according to the deterioration of the fresh meat. From the experiment, it can be included that with the extension of time, some alkaline substance released by the fish will change the molecular structure of anthocyanin, and the film can

收稿日期：2021–08–31
基金项目：安徽省高校协同创新项目（GXXT–2019–017）；安徽省重点研究与开发计划面上攻关项目（1804a09020089）；国家级大学生创新创业训练计划（202010364015）
作者简介：姚乐（1996—），男，安徽农业大学硕士生，主攻静电纺食品包装材料。
通信作者：李中波（1984—），男，博士，安徽农业大学副教授，主要研究方向为食品包装材料。

quickly change color in response to the rotting condition of fish, so as to achieve the real-time visual monitoring of the fish freshness.

KEY WORDS: food freshness; indicating packaging; anthocyanins; chitosan

食品新鲜度指示型包装是智能包装的一种，通过包装上的指示信息可以直观定性或者定量地了解食品的品质信息[1]。目前食品新鲜度指示型包装主要分为时间–温度指示型和颜色指示型[2]。时间–温度指示型指通过发生物理或化学变化来产生时间温度累积效应，从而用来记录产品的温度变化历程，并指示产品剩余的货架信息，但是这种方式成本较高。颜色指示型包装的指示形式直观且成本较低，在食品代谢过程中产生的一定物质与包装的指示剂反应[3]，从而导致指示材料颜色发生改变，消费者只需要通过查看包装的指示剂变化情况，就可以更加直观地监测包装内食品的新鲜度和腐败程度，对于食品安全和环境保护都有重要的价值。其中，pH 敏感指示型包装在果蔬、生鲜、肉类等需要长时间保鲜的食品中均可以应用[4]，具有广阔的应用前景。国内外对于新鲜度指示包装的研究也越来越深入，有些国家已经将新鲜度指示标签纳入实际食品的新鲜度检验中[5]。

从当前研究现状来看，关于新鲜度指示薄膜领域的研究方法和方式也呈现出多样性。例如，贾代涛等[6]以聚乙烯醇（PVA）为成膜基材，以瑰茄花青素为新鲜度指示剂制备了指示薄膜，该薄膜从酸性到碱性的颜色变化是由红变浅粉再变为绿色。黄佳茵等[7]以改性 PVA 为成膜基材，以溴甲酚紫和甲基红为混合指示剂，制备了复合指示剂薄膜，实现了虾类的新鲜度指示。马倩倩等[8]采用玉米淀粉、无水氯化钙、环氧树脂为原料，基于淀粉–碘的显色反应制成变色材料，其颜色明显从浅青色变为棕红色。Chun 等[9]利用溴甲酚绿在 pH=3.8 时呈黄色，在 pH=5.4 时呈黄绿色，依据其对碱敏感的特性，制备出针对猪肉保鲜的新鲜指示剂。杜月红等[10]使用甲基纤维素、聚乙二醇– 6000 为成膜基材，以溴甲酚紫、溴百里酚蓝为指示剂，成功制成 6 种方便、无损的新鲜指示剂，得出 pH=4.24 时的指示标签有较好的指示效果。在应用过程中发现，化学合成指示剂存在 pH 显色范围小、颜色变化单一等一系列问题，并且长期将其用于食品包装会对人们的健康产生潜在的威胁。由此可见，制备一种绿色、功能性较强、环保且对 pH 敏感的食品新鲜度可视化检测包装薄膜具有重要的意义。

目前，对 pH 敏感的天然植物提取物指示剂主要包括花青素、姜黄素、茜素红、紫草素和甜菜色素等。花青素是一种天然色素，是花色苷水解后得到的苷元，容易受到温度、光照、pH 等的影响，以致颜色发生变化，且在不同 pH 值下呈现不同的颜色，其色谱丰富，适合用做指示剂[11]。文中研究采用具有良好成膜性、可降解性和抗菌性能的壳聚糖作为指示包装的成膜基材，并添加甘油来提高复合膜的塑性，添加花青素作为 pH 酸碱指示剂，通过流延法来制备指示膜，并以花青素的添加量为变量探究复合指示薄膜在不同 pH 溶液和气氛中对显示性能的影响，最后以鱼肉为研究对象，来研究指示薄膜在鱼肉腐败过程中的颜色响应变化。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料：壳聚糖，中黏度（200~400 mPa·s），上海麦克林生化科技有限公司；花青素粉末，花青素有效含量（质量分数）为 25%，西安隆泽生物工程有限责任公司；甘油，汕头市光华化学厂；冰醋酸，山东萍聚生物科技有限公司；盐酸、氨水，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；新鲜活鱼，当地菜市场。

主要仪器：DHG 系列电热恒温鼓风干燥箱，合肥德扬仪器设备有限公司；ALPHA 傅里叶变换红外光谱，布鲁克科技有限公司；DK–S22 电热恒温水浴锅，上海申贤恒温设备厂；XLW 智能电子拉力机，济南兰光机电技术有限公司；MD710 数显千分尺，东莞市特马电子有限公司；BL–220H 电子天平，日本岛津有限公司；S–4800 扫描电子显微镜，日本日立公司；CR–20 型色差计，日本柯尼卡美能达有限公司。

1.2 方法

用一次性无菌注射器准确量取 0.5 mL 冰醋酸于 40 mL 的纯水中，用电子天平称取 0.75 g 壳聚糖溶于 40 mL 的醋酸（质量分数为 1%）溶液中，再置于恒温磁力搅拌器（60 ℃）中搅拌 1 h，然后加入 0.075 g 甘油，继续搅拌 20 min。分别准确称取 0、0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 g 花青素粉末，将其溶于 9.1 mL 的纯水中，于温度 35 ℃下，在恒温磁力搅拌器中搅拌 1 h，直至花青素粉末完全溶解。将配置好的花青素溶液与壳聚糖溶液混合，在 35 ℃恒温磁力水浴锅中搅拌 1 h，再加入甘油 0.075 g，继续搅拌 20 min，直至混合均匀。将配置好的溶液静置至气泡完全消失，得到花青素粉末质量分数不同的花青素–壳聚糖混合溶液。最后将配置好的花青素–壳聚糖混合溶液倒入直径为 144 mm 的培养皿中，放入烘箱中，设定温度为 38 ℃，平稳放置烘干 12 h。待完全成膜后，揭下并

放在密封袋中，并做好标记。

1.3　表征与测试

1.3.1　微观形貌观察

将样品裁切成 5 mm×5 mm 的小方块薄膜，经真空溅射喷金处理 30 s 后，采用 S–4800 型扫描电子显微镜（SEM）在不同倍数下观察其表面微观形貌，并拍照。

1.3.2　力学性能测定

将制备的样品裁剪成两头宽度为 0.8 cm，中间宽度为 0.4 cm，总长度为 5 cm 的两边宽中间细的杠铃状。使用 MD710 数显千分尺（±0.001 m）对膜厚度进行测定，从上往下选取 5 个点，然后求其平均值。参照 GB/T 1039—1992，使用 XLW 智能电子拉力机设置初始拉伸距离为 20 mm，拉伸速度为 25 mm/min，每组测试 5 个平行试样，计算其平均值。

1.3.3　傅里叶变换红外光谱表征

取纯壳聚糖薄膜和不同浓度的壳聚糖/花青素复合膜样品，然后裁切成 1 cm×1 cm 的薄片，置于水平的全反射红外光谱法（ATR）样品台上，然后用 ATR 金属销压紧样品，扫描波数为 4 000~400 cm^{-1}，仪器分辨率为 4 cm^{-1}，波数精度为 0.01 cm^{-1}，然后采集薄片的红外光谱，并进行数据处理。

1.3.4　不同 pH 溶液下显色测试

首先配置标准 pH 缓冲试剂，将 pH 值不同的粉末倒入 250 mL 容量瓶中，以无 CO_2 蒸馏水冲洗塑料袋，稀释到刻度后摇匀待用，配置成 pH 值分别为 1.68、4.01、6.86、10.01、12.45 的 pH 缓冲溶液。然后分别将浓度不同的花青素–壳聚糖复合膜裁剪成 6 个直径为 3 cm 的圆片，并放入装有不同缓冲溶液的透明螺口瓶中，静止 30 min 后取出，在相同光源下拍照记录。

1.3.5　不同 pH 下的气氛显色测试

分别配置 40 mL 盐酸和氨水浓度（质量分数）为 0、1%、5%的溶液，并置于不同的透明广口瓶中。将不同含量花青素的复合膜裁剪成直径约为 3 cm 的圆形薄片，并将其分别悬挂在不同浓度的盐酸和氨水的溶液上方，密闭瓶口，每隔 4 h 拍照，待所有样品颜色稳定后，取出并拍照记录。

1.3.6　鱼肉新鲜度指示测试

将活鱼经过处理后，切成 5 块约 50 g 的鱼肉，分别放进 4 个 125 mL 的广口瓶中，另外设置一组对照。将花青素粉末质量分数为 0.1%、0.3%的复合膜，各剪出 2 个直径约 3 cm 的样品，用细线把样品悬挂在鱼肉上方。给广口瓶做好标记，选择 2 个样品放入 40 ℃烘箱中，另外 2 个样品置于室温 20 ℃和冷藏 7 ℃的环境中，每隔 4 h 拍照，待所有样品不变色后取出，拍照并做好记录。

2　结果与分析

2.1　复合膜微观形貌分析

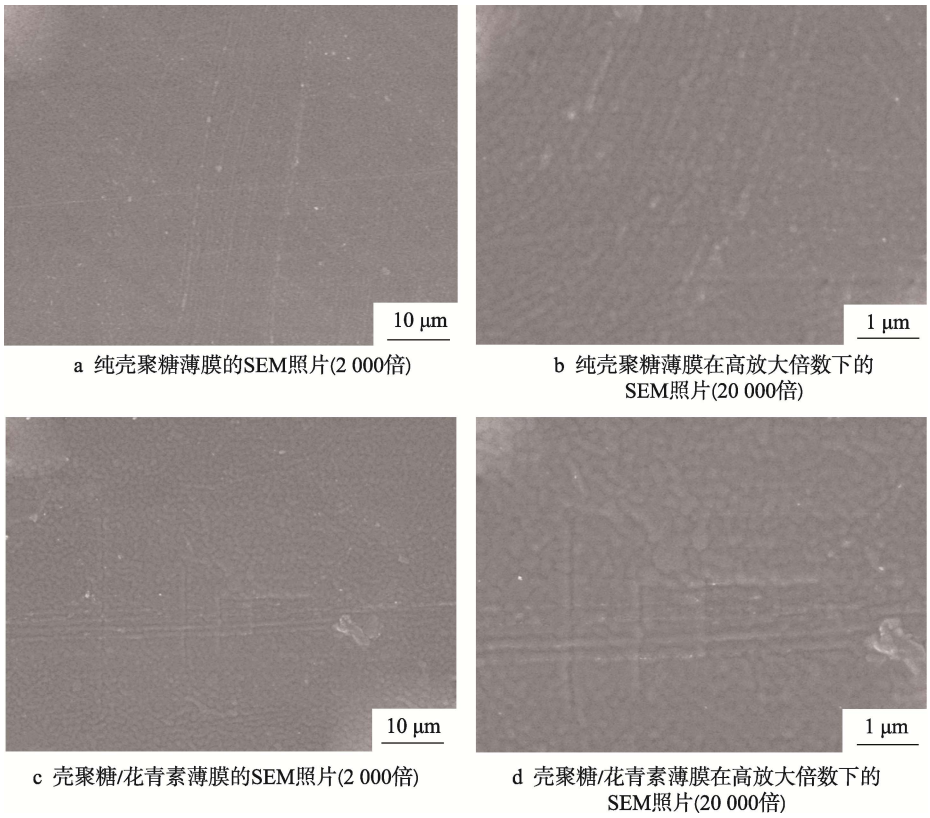
纯壳聚糖薄膜和壳聚糖/花青素复合薄膜分别在放大倍数为 2 000 倍和 20 000 倍下所拍摄的 SEM 照片见图 1。由从图 1a 和 b 可以看出，纯壳聚糖薄膜的表面较为光滑，仅有少数纹理形貌，并无明显的裂痕和孔洞结构，说明此壳聚糖浓度参数下的成膜性能较优异。由图 1c 和 d 可以看出，在添加花青素后，复合薄膜的形貌相比纯壳聚糖薄膜仍旧比较光滑，仅有少量的龟裂形貌，从宏观上看并无明显孔洞和团聚现象，说明花青素在壳聚糖体系中有很强的适应性[12]，花青素粉末可以均匀地分散在壳聚糖成膜体系中[13]。

2.2　复合膜的力学性能

从图 2 可以看出，随着花青素粉末含量的增加，复合薄膜的抗拉强度有明显降低的趋势。纯壳聚糖薄膜的抗拉强度为 12.01 MPa，当复合薄膜中花青素粉末质量分数为 0.3%时，其抗拉强度仅为纯壳聚糖的 33%，约为 3.98 MPa。这主要是因为在壳聚糖体系中引入花青素后，花青素与壳聚糖之间形成了一定的作用力，破坏了壳聚糖分子之间的有序排列[14]，降低了壳聚糖薄膜的结晶度，因而随着花青素含量的不断增大，其抗拉强度持续下降。当花青素含量继续增加，抗拉强度仅略有提升，这可能是花青素与壳聚糖分子之间的氢键作用所致。一般来说，材料的抗拉强度因其结晶度作用强于其分子间氢键[15]，所以添加花青素粉末的复合膜的抗拉强度仍显著低于纯壳聚糖。此外，从图 2 中还可以看出，随着花青素加入量的增加，复合膜的断裂伸长率呈现下降的趋势，原因可能是随着花青素浓度的升高，影响了壳聚糖分子之间的作用力[16]，使得其断裂伸长率不断降低。

2.3　复合膜的红外光谱分析

花青素粉末、纯壳聚糖膜、壳聚糖/花青素复合膜的傅里叶红外光谱见图 3。由图 3 可知，在 1 019 cm^{-1} 处的特征峰属于花青素中芳香环的 C—H 振动特征峰，在 1 249 cm^{-1} 处的吸收振动峰属于花青素中酚类黄烷酮基团的杂环吡喃环的拉伸振动[17]，在 1 620 cm^{-1} 处的特征峰属于花青素中的芳族 C=C 伸缩振动峰。通过分析纯壳聚糖薄膜和添加花青素的复合膜的红外光谱可知，在 1 588 cm^{-1} 处的特征峰属于壳聚糖中的 N—H 的弯曲振动，另外在 1 403 cm^{-1} 处的特征峰是 C—H 和 N—H 2 个伸缩振动峰的耦合。

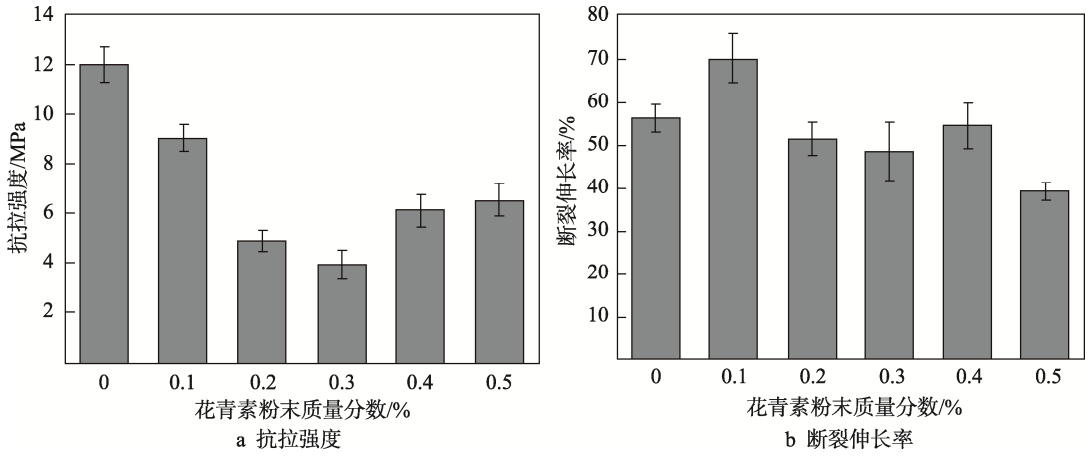


a 纯壳聚糖薄膜的SEM照片(2 000倍)　b 纯壳聚糖薄膜在高放大倍数下的SEM照片(20 000倍)

c 壳聚糖/花青素薄膜的SEM照片(2 000倍)　d 壳聚糖/花青素薄膜在高放大倍数下的SEM照片(20 000倍)

图 1　不同薄膜的 SEM 照片

Fig.1 SEM photos of different films



a 抗拉强度　b 断裂伸长率

图 2　不同花青素粉末含量下复合薄膜的力学性能

Fig.2 Mechanical properties of composite films with different anthocyanin powder contents

在 1 164 cm^{-1} 和 1 083 cm^{-1} 处的特征峰分别由 C—O—H 和 C—O 伸缩振动引起，在 899 cm^{-1} 处的特征峰属于壳聚糖中环的振动[18]，在 2 882 cm^{-1} 处的特征峰属于壳聚糖和花青素中 C—H 的伸缩振动。值得注意的是，在 3 422、3 380 cm^{-1} 处都出现了宽峰，此处特征峰应属于壳聚糖中 O—H 或 N—H 的伸缩振动，而添加花青素后羟基特征峰有所偏移，这是因为花青素与壳聚糖产生了分子间氢键[19]。

2.4　复合膜在不同 pH 溶液下的显色

不同花青素粉末含量下的复合膜在不同 pH 溶液中浸泡后的显色图片见图 4—5。从图 4—5 可以看出，在不同 pH 的缓冲液中，壳聚糖/花青素薄膜的颜色变化显著，当薄膜中的含量不同时，花青素在相同 pH 的缓冲溶液中呈现的颜色也略有不同。当复合薄膜浸泡在 pH 为 1.68（强酸条件）的缓冲溶液中时颜色呈现红色。随着花青素浓度的增加，复合薄膜的颜色

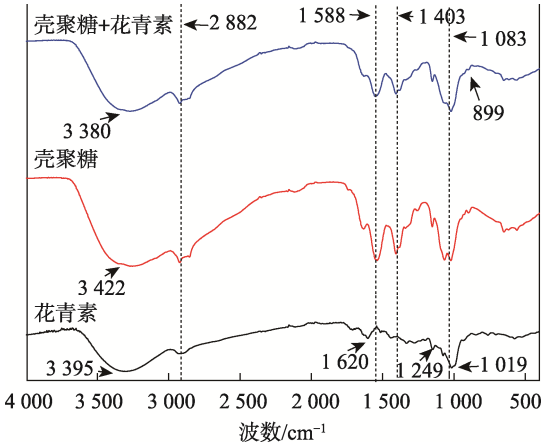


图 3　花青素粉末、纯壳聚糖薄膜以及复合膜的红外光谱

Fig.3 Infrared spectra of anthocyanin powder and pure chitosan film and composite film

从淡红色逐渐变为深红色。当复合薄膜浸泡在 pH 为 4.01 的溶液中时整体呈现紫红色。在 pH 为 6.86 和 7 的溶液中，薄膜的颜色较为相近，且薄膜呈现蓝紫色。当复合薄膜浸泡在 pH 为 10.01 的碱性缓冲溶液中时，指示薄膜呈现蓝灰色。当复合薄膜浸泡在 pH 为 12.45 的溶液中时呈现棕黄色，且随着花青素含量的增加，颜色不断加深。说明花青素分子很容易受到 pH 的影响。在花色苷分子中，吡喃环上的氧原子为四价碱性，酚羟基上的氢可以解离并且是酸性的，这导致花青素在不同的 pH 下以 4 种结构形式出现[20]：在 pH 为 2~4 的溶液中，黄色盐离子大量存在，所以呈现红色；在 pH 为 4~6 的溶液中，醌结构大量存在，所以逐渐变为粉红；在溶液碱性增强时，pH 为 8~10 时转变为假碱，逐渐呈现黄色；在 pH 大于 10 时，花青素降解，彻底变为黄色[21]。

不同复合薄膜在不同浓度酸碱溶液气氛下的显色照片见图 6—7。从图 6—7 中可以看出，在不同

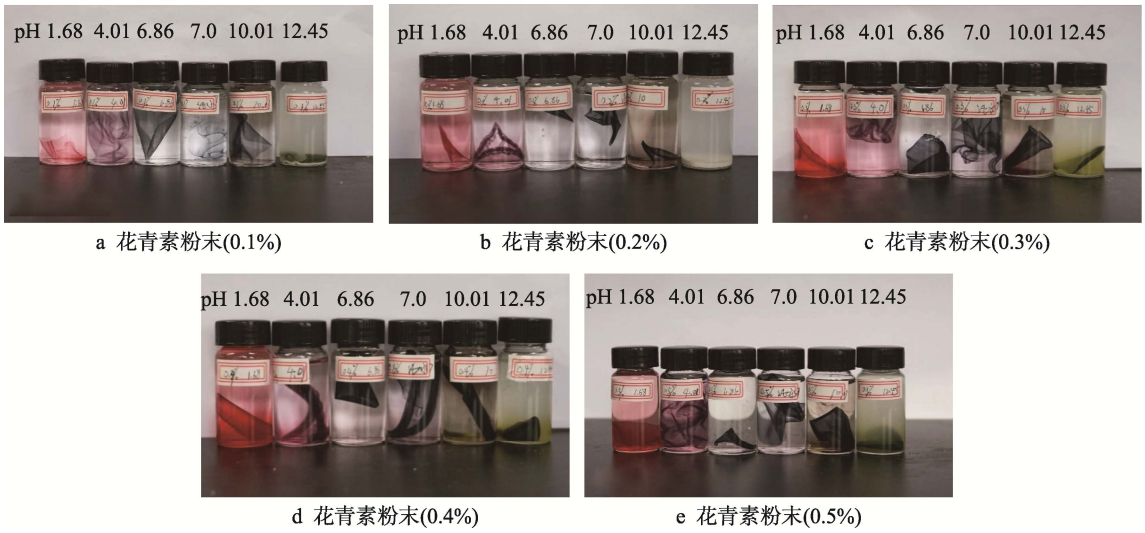


图 4　不同花青素粉末含量的复合膜在不同 pH 溶液中的显色照片

Fig.4 Color of composite films with different anthocyanin powder contents in solutions with different pH values

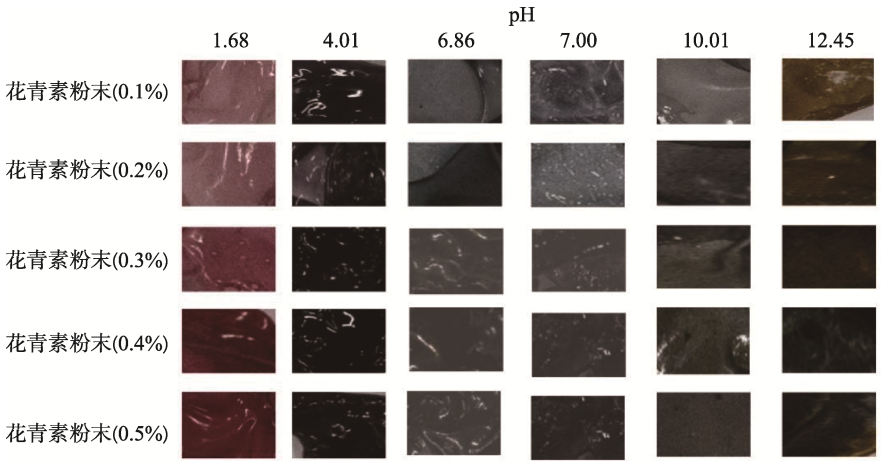


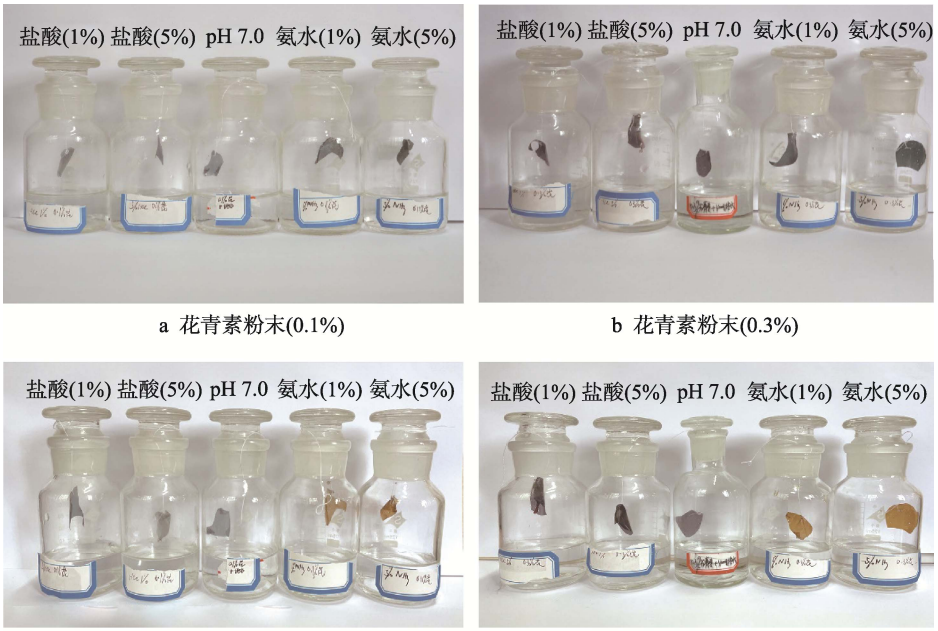
图 5　不同花青素粉末含量的复合膜在不同 pH 溶液中浸泡后的显色照片

Fig.5 Color of composite films with different anthocyanin powder contents soaked in solutions with different pH values

酸碱溶液的气氛中，复合薄膜的颜色均发生了变化。对比不同的显色结果可以看出，在氨水的环境气氛中复合薄膜的颜色变化比在盐酸气氛中的颜色变化得更加明显；在氨水溶液气氛下，薄膜呈现明显的棕黄色，且随着氨水浓度的增加，棕黄色逐渐加深；在盐酸溶液气氛中，复合薄膜颜色变化呈现浅蓝色，与纯水气氛中相比颜色较浅。进一步在相同溶液气氛中对比不同花青素含量对复合薄膜显色变化的结果可知，当复合薄膜中花青素粉末的质量分数为 0.3%时，颜色变化相比花青素粉末质量分数为 0.1%的复合薄膜颜色变化更加明显，视觉显色效果更佳。在不同的气氛中，盐酸会挥发出 HCl 气体，氨水会挥发氨气，这些挥发性气体容易被壳聚糖复合薄膜所捕获，使得花青素产生分子结构的变化[22]，从而呈现出不同的颜色。值得注意的是，花青素在碱性气体氛围中的变化较明显，因而花青素复合薄膜比较适合作为肉蛋类等食品新鲜度指示包装的指示剂。

2.6　复合薄膜用于鱼肉的显色性能

为了进一步验证复合指示薄膜的显色性能，将薄膜分别置于温度 20、15、7 ℃下装有新鲜鱼肉的密闭容器中，观察指示薄膜的显色效果，具体显色情况见图 8。从图 8 可以看出，在 3 种温度下放置花青素质量分数为 0.3%的复合膜，随着鱼肉新鲜程度的不同，复合膜由原本的蓝紫色逐渐变成浅棕色，随后变成深棕黄色，最后复合膜变成咖啡色。分析颜色变化的原因可知，鱼肉在变质过程中会释放出挥发性有机胺、氨气等碱性气体，这些气体会被壳聚糖/花青素指示薄膜所吸附，从而发生颜色的变化[12]。根据现行标准，鱼类二级鲜度的标准要求挥发性盐基氮值<20 mg/hg，一级鲜度的标准要求挥发性盐基氮值<13 mg/hg[23]。通过对比在不同温度下放置薄膜的颜色变化可以看出，壳聚糖/花青素复合膜颜色变化过程均基本一致，但是温度越高鱼肉的变质速度越快。通过滴定法[24]测量鱼肉在 15 ℃下挥发性盐基氮的含量随时间的变化情况见图 9，并通过色差仪计算了在温度 7、15 ℃



a 花青素粉末(0.1%)　　b 花青素粉末(0.3%)

c 花青素粉末(0.1%), 悬挂24 h后　　d 花青素粉末(0.3%), 悬挂24 h后

图 6　不同花青素粉末浓度的薄膜在不同酸碱气氛中的显色图片

Fig.6 Color of films with different anthocyanin powder concentration in different acid-base atmosphere

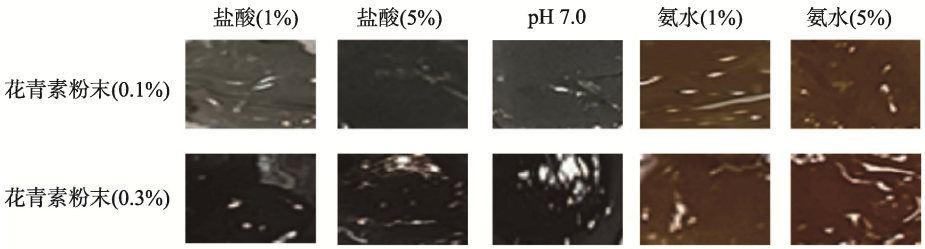


图 7　不同花青素粉末浓度的薄膜在不同酸碱气氛中显色后的图片

Fig.7 Pictures of films with different anthocyanin powder concentrations developed in different acid and base atmospheres

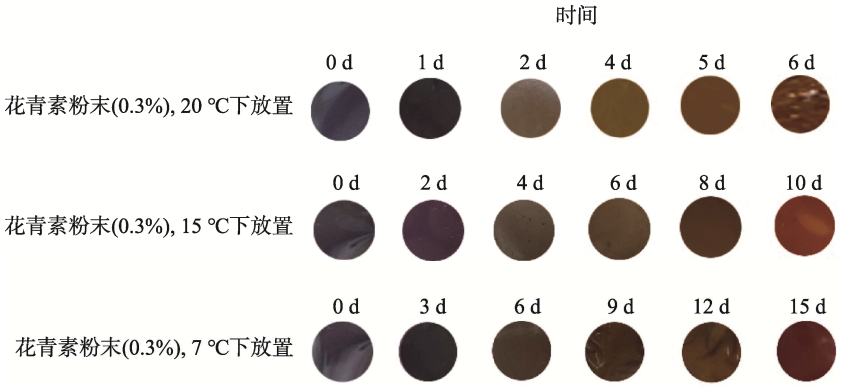


图 8　不同花青素粉末含量的薄膜在不同鱼肉新鲜度下的显色照片

Fig.8 Color of films with different anthocyanin powder contents under different freshness of fish

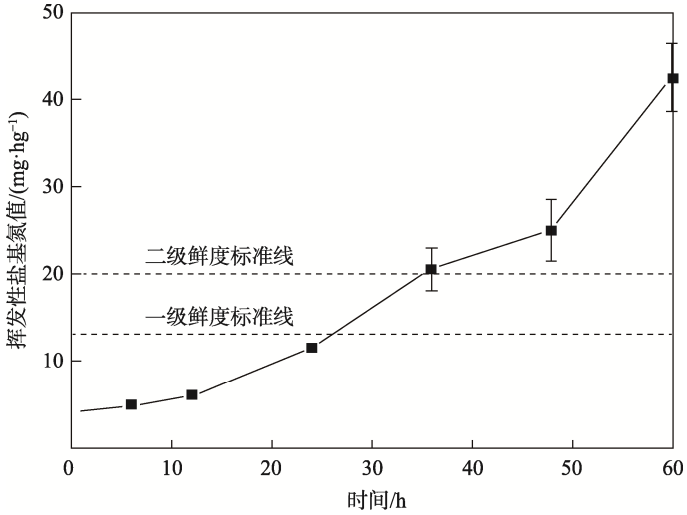


图 9　30 g 鱼肉在 15 ℃下挥发性盐基氮值随时间的变化情况

Fig.9 Variation of volatile base nitrogen values of 30 g fish at 15 ℃ with time

下放置时不同腐败程度的样品色差，进而合理分析不同腐败程度下薄膜的显色响应，具体腐败程度与色差相关性见图 10。此次鱼肉新鲜度指示的实验结果表明，花青素粉末质量分数为 0.3%的复合膜对鱼肉的变质程度有很明显的颜色响应变化，适合作为海鲜鱼肉新鲜度可视化监测包装材料。

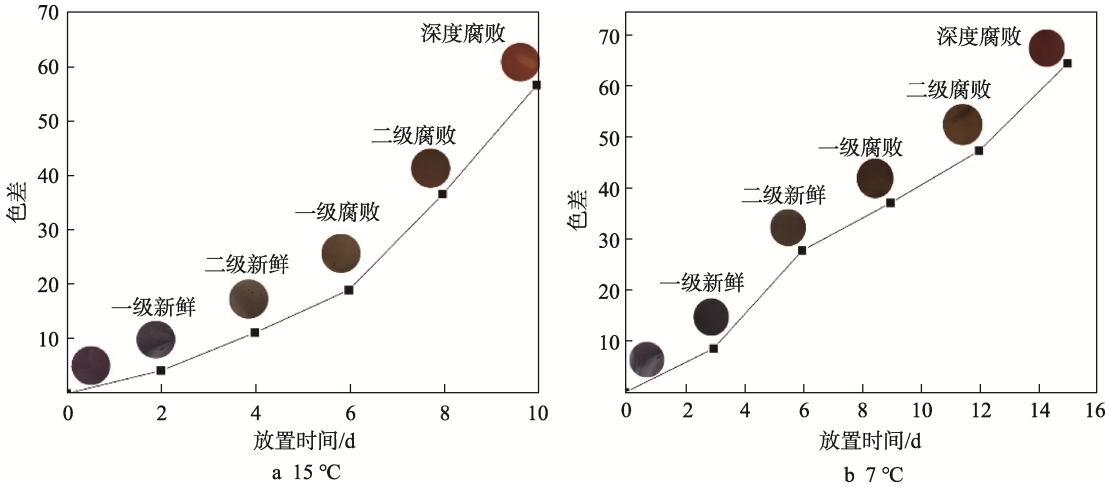


图 10　鱼肉腐败程度与薄膜色差响应

Fig.10 Response diagram of fish spoilage degree and film color difference

3 结语

以壳聚糖为成膜基材，以花青素为指示剂，基于流延法制备了可用于鱼肉新鲜度指示的壳聚糖/花青素复合薄膜。微观形貌表明，复合薄膜的表面较为平整，花青素均匀地分散在壳聚糖薄膜体系中。力学性能测试表明，花青素的添加会导致复合膜抗拉强度和断裂伸长率的降低，复合薄膜的抗拉强度随着花青素质量分数的增加总体呈现下降的趋势，当复合薄膜中花青素粉末质量分数为 0.3%时，其抗拉强度仅为纯壳聚糖薄膜的 33%，为 3.98 MPa。红外吸收光谱表明，壳聚糖分子与花青素分子产生了一定的氢键作用。所制备的复合薄膜在不同 pH 缓冲液中均发生了显著的颜色变化，随着浸泡缓冲溶液 pH 的增加，指示薄膜从红色逐渐变为黄色。制备的指示复合薄膜在不同酸碱气氛中也呈现良好的显色性能，在氨水气氛中，指示薄膜呈现棕黄色。最后将制备的复合指示薄膜进行鱼肉新鲜度可视化监测，指示薄膜随着鱼肉腐败程度的增加，由蓝紫色变为棕黄色，最后呈现深棕黄色，壳聚糖中花青素粉末质量分数为 0.3%时，显色效果最佳。此外，所制备的复合指示薄膜在低温储存环境中依然具有较好的显色效果，因此壳聚糖/花青素复合薄膜可以用于肉类新鲜度可视化监测。

参考文献：

[1] SOLEYMANIS, HABTEMARIAMS, RAHIMIR, et al. The what and who of Dietary Lignans in Human Health: Special Focus on Prooxidant and Antioxidant Effects[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 382-390.

[2] MO Ri-jian, QUAN Qin-guo, LI Ting, et al. An Intelligent Label for Freshness of Fish Based on a Porous Anodic Aluminum Membrane and Bromocresol Green[J]. Chemistry Select, 2017, 2(28): 8779-8784.

[3] CHEN Hui-zhi, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Development of a Novel Colorimetric Food Package Label for Monitoring Lean Pork Freshness[J]. LWT, 2019, 99: 43-49.

[4] CHEN Shu-jing, WANG Yuan, LIANG Chun-xiao, et al. Buyang Huanwu Decoction Ameliorates Atherosclerosis by Regulating TGF-β/Smad2 Pathway to Promote the Differentiation of Regulatory T Cells[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 269: 113724.

[5] DE CASTRO LEÃOM, RAFFIN POHLMANNA, DE CRISTO SOARES ALVESA, et al. Docosahexaenoic Acid Nanoencapsulated with Anti-PECAM-1 as Co-Therapy for Atherosclerosis Regression[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2021, 159: 99-107.

[6] 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.
JIADai-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.

[7] 黄佳茵，周雅琪，陈美玉，等. 基于甲基纤维素改性聚乙烯醇指示膜的制备、表征及对南美白对虾的鲜度指示[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 194-203.
HUANG Jia-yin, ZHOU Ya-qi, CHEN Mei-yu, et al. Preparation and Characterization of Indicator Films Based on Polyvinyl Alcohol Modified by Methyl Celluloseand pH-Sensitive Dyes for Shrimp Freshness Monitoring[J]. Food Science, 2021, 42(3): 194-203.

[8] 马倩倩，王秀峰，岳桂贞,等. 食品新鲜度标签材料时间–温度偶合作用及应用分析[J]. 陕西科技大学学报, 2020, 38(2): 53-60.
MA Qian-qian, WANG Xiu-feng, YUE Gui-zhen, et al. Analysis of the Application and the Correlation between Time and Temperature of Foods Freshness Indication Label Materials[J]. Journal of Shaanxi University of Science &Technology, 2020, 38(2): 53-60.

[9] CHUN H N, KIM B, SHIN H S. Evaluation of a Freshness Indicator for Quality of Fish Products during Storage[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(5): 1719-1725.

[10] 杜月红，王琳，高晓光,等. 猪肉新鲜度指示标签的制备及应用[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 41-47.
DU Yue-hong, WANG Lin, GAO Xiao-guang, et al. Preparation and Application of Indicator LabelsforIdentification of Pork Freshness[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 41-47.

[11] JIA Cai-hua, LI Jing-huan, ZHANG Ming-xing, et al. Antioxidant Properties of the Extracts of Vine Tea (Ampelopsis Grossedentata) with the Different Color Characteristics and Inhibition of Rapeseed and Sunflower Oil Oxidation[J]. LWT, 2021, 136: 110292.

[12] 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 Chua-nai, et al. Research Advancesin Application of Color Indicator Intelligent Packaging for Monitoring Freshness of Raw Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(6): 318-324.

[13] FEGAN N, JENSON I. The Role of Meat in Foodborne Disease: Is there a Coming Revolution in Risk Assessment and Management? [J]. Meat Science, 2018, 144: 22-29.

[14] TAHERI-GARAVAND A, FATAHI S, OMID M, et al. Meat Quality Evaluation Based on Computer Vision Technique: A Review[J]. Meat Science, 2019, 156: 183-195.

[15] 翟晓东. 基于比色型智能指示标签的典型冷鲜肉新鲜度实时监测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 44-52.
ZHAI Xiao-dong. Research on Real-Time Monitoring of Typical Chilled Meat Freshness Based on Colorimetric Intelligent Indicator Label[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 44-52.

[16] ZHAI Xiao-dong, SHI Ji-yong, ZOU Xiao-bo, et al. Novel Colorimetric Films Based on Starch/Polyvinyl Alcohol Incorporated with Roselle Anthocyaninsfor Fish Freshness Monitoring[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 308-317.

[17] GRAU R, SÁNCHEZA J, GIRÓN J, et al. Nondestructive Assessment of Freshness in Packaged Sliced Chicken Breasts Using SW-NIR Spectroscopy[J]. Food Research International, 2011, 44(1): 331-337.

[18] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Non-Invasive Analytical Technology for the Detection of Contamination, Adulteration, and Authenticity of Meat, Poultry, and Fish: A Review[J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 853: 19-29.

[19] SIVERTSENA H, KIMIYA T, HEIA K. Automatic Freshness Assessment of Cod (Gadus Morhua) Fillets by Vis/Nir Spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 317-323.

[20] 陈雪风, 艾月, 史淞浩, 等. pH 响应性食品包装材料的制备及其对酸性气体的识别指示性研究[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 159-167.
CHEN Xue-feng, AI Yue, SHI Song-hao, et al. Preparation of pH-Responsive Food Packaging Materials and Study of Acid Gas Indication[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 159-167.

[21] 王芳, 陈满儒, 赵郁聪, 等. 冷鲜肉新鲜度指示标签的研究及应用进展[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 83-90.
WANG Fang, CHEN Man-ru, ZHAO Yu-cong, et al. Progress in Study and Application of Chilled Meat Freshness Indicator[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 83-90.

[22] 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 CatfishPackaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 1-6.

[23] 刘大松. 草鱼肉在微冻和冰藏保鲜中的品质变化及其机理[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 38-46.
LIU Da-song. Quality Changes of Grass Carp Muscle during Partial-Frozen and Iced Storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.

[24] 张越, 宫田娇. 食品中挥发性盐基氮检测技术研究[J]. 现代食品, 2019(24): 188-189.
ZHANG Yue, GONG Tian-jiao. Study on the Determination Technology of Volatile Base Nitrogen in Food[J]. Modern Food, 2019(24): 188-189.

责任编辑：彭颋