

负载花青素水产品新鲜度指示膜的研究进展

赵遵乐¹ 李 昀^{1,2} 李 雨¹ 索劲铁¹ 张 淳¹

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300392; 2. 国家大宗淡水鱼加工技术分中心, 天津 300392)

摘要: 负载花青素的新鲜度指示膜能通过颜色变化直观反映水产品的的新鲜度, 其对 pH 敏感, 具有天然安全、抗氧化等特性。虽已有大量研究, 但其在显色、稳定性和灵敏度等方面仍面临巨大挑战。文章主要综述了天然花青素在 pH 敏感性指示膜中的研究及在水产品新鲜度监测中的应用, 展开分析了花青素作为指示剂的优势, 进一步讨论了改善花青素指示膜性能的措施, 重点讨论了提高花青素在指示膜中的稳定性、扩大显色范围的方法, 并阐述了花青素指示膜应用的局限及未来发展趋势。

关键词: 指示膜; 花青素; 水产品; 新鲜度检测; 智能包装

Research progress of anthocyanin-loaded aquatic product freshness indicator films

ZHAO Zunle¹ LI Yun^{1,2} LI Yu¹ SUO Jintie¹ ZHANG Chun¹

(1. College of Food Science and Biological Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;

2. National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing, Tianjin 300392, China)

Abstract: Anthocyanin-loaded freshness indicator films can intuitively reflect the freshness of aquatic products through color changes. They are pH-sensitive and have characteristics such as natural safety and antioxidant properties. Although there have been a large number of studies on them, they still face huge challenges in aspects such as color development, stability, and sensitivity. This paper mainly summarizes the research on natural anthocyanins in pH-sensitive indicator films and their application in monitoring the freshness of aquatic products. The advantages of anthocyanins as indicators are analyzed, and measures to improve the performance of anthocyanin-loaded indicator films are further discussed. The focus is on improving the stability of anthocyanins in indicator films and expanding the color range. The paper also points out the application limitations and future development trends of anthocyanin-loaded indicator films.

Keywords: indicator films; anthocyanin; aquatic products; freshness detection; intelligent packaging

水产品由于自身水分含量高, 营养物质丰富, 加之捕捞后不合理的储运和包装, 极易腐败变质^[1]。而水产品新鲜度检测的方法大多操作复杂, 耗时长, 成本高, 且对仪器的精度和检测人员的技术有较高要求^[2]。消费者很难利用这些方法来判断水产品的的新鲜程度, 亟须一种能够快速、无损、可实时检测新鲜度的方法。

在此背景下, 新型的活性指示包装应运而生。它将智能指示与传统包装相结合, 通过指示剂监测食品的新鲜程度, 同时发挥抗氧化、抑菌作用, 并产生防腐保鲜的

效果^[3], 帮助食品供应链的参与者和消费者轻松监测水产品的的新鲜度。天然花青素作为指示剂具有与化学合成染料等等的食品质量监测功能, 且安全无毒, 对环境友好, 所具有的抗氧化性还能够延长食品的货架期^[4]。水产品腐败产生的特性气体在与花青素反应后, 展现出不同的颜色, 颜色变化对应水产品的的新鲜程度, 消费者通过肉眼观察, 即可判别内容物是否有败坏的情况发生^[5]。

目前, 各类花青素指示膜已被成功研发、应用于果蔬、肉类和乳制品等的新鲜度监测中。如 Li 等^[6]制备了

基金项目: 天津市淡水养殖产业技术体系创新团队(水产品加工岗位)项目(编号: ITTFRS2021000-012)

通信作者: 李昀(1974—), 女, 天津农学院副教授, 硕士。E-mail: liyun_nxy@126.com

收稿日期: 2024-11-21 **改回日期:** 2025-07-17

引用格式: 赵遵乐, 李昀, 李雨, 等. 负载花青素水产品新鲜度指示膜的研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 200-208.

Citation: ZHAO Zunle, LI Yun, LI Yu, et al. Research progress of anthocyanin-loaded aquatic product freshness indicator films[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 200-208.

含蓝莓花青素的复合膜,可用于监测蓝莓的新鲜度。Chen等^[7]提取了李子皮花青素并制备了指示膜,实现了鸡肉新鲜度的实时监测。Özgen等^[8]制备了含接骨木花青素的智能包装膜,可监测牛奶的新鲜度。但研究尚有不足之处:花青素易受环境因素影响发生降解,影响指示膜的变色效果和使用寿命;膜基材的选择、制膜方法等对花青素的兼容性和稳定性有一定的影响,会限制指示膜性能的优化。

综述拟探讨负载花青素的指示膜在水产品新鲜度检测方面的最新研究成果,重点介绍提高花青素在指示膜中呈色效果、灵敏度及稳定性的方法,并阐述负载花青素指示膜应用的局限及未来发展趋势,以期在花青素在指示包装领域的研究应用提供理论参考。

1 天然花青素作为颜色指示剂的优势

1.1 安全无毒、来源丰富易获取

指示剂通过与包装内容物产生的特征气体相互作用,以颜色的变化反映食品的新鲜程度^[9]。传统的化学合成染料(甲基红、溴甲酚紫等)显色范围窄、颜色变化较为单一^[10]、具有潜在的毒性,对人体存在健康风险^[11]。而花青素类是存在于植物中的天然色素^[12],主要源于果蔬、花

卉、谷物及其加工后的副产品^[13],来源广泛、提取成本相对较低,且对人体健康无害,还具有一定的抗氧化、抑菌功效。数据表明,来自果蔬、花卉的花青素的食物指示标签最多^[14-15],以此取代化学合成染料符合消费者对天然、健康产品的期望。

1.2 对pH敏感且显色范围广

花青素的结构在不同的酸碱环境中会发生改变、呈现不同的颜色,从而满足颜色指示的要求。其结构变化主要有4种状态:黄酮阳离子、甲醇伪碱、查尔酮、喹啉碱^[16]。强酸(pH<3.0)条件下,花青素分子结构相对稳定,呈红色;酸性(pH 4.0~6.0)条件下,花青素溶液变浅呈紫色;中性或弱碱性(pH 7.0~9.0)条件下,呈无色或蓝色;强碱(pH>10.0)条件下呈绿色或黄色^[17]。表1总结了常见的天然色素在不同pH条件下的呈色变化。各天然色素在不同pH环境中均有不同的颜色变化。姜黄素和甜菜素的显色较为单一,不易区分。相比之下,花青素显色范围更广、更丰富,肉眼区分更明显。例如,紫山药花青素在pH 2.0~12.0缓冲溶液中颜色变化为红色—紫红色—紫色—深紫色—墨绿色—黄棕色—棕红色^[25]。蓝莓花青素在pH 2.0~12.0缓冲溶液中颜色变化为灰粉色—灰色—灰绿色—蓝灰色—蓝色—绿色^[26]。

表1 常见天然色素在不同pH条件下的颜色响应

Table 1 Color response of common natural pigments under different pH conditions

天然色素	来源	天然色素在不同pH条件下的颜色响应	参考文献
花青素	桑树	橘色(pH 2.0)、粉紫色(pH 4.0~6.0)、紫色(pH 8.0~10.0)、棕色(pH 12.0)	[18]
	洛神花	橘色(pH 2.0~4.0)、粉色(pH 6.0)、紫色(pH 8.0~10.0)、棕色(pH 12.0)	[18]
	玫瑰	红色(pH 2.0~3.0)、玫红色(pH 4.0~5.0)、紫色(pH 6.0~7.0)、蓝色(pH 8.0~9.0)、绿色(pH 11.0~12.0)	[19]
	紫甘薯	红色(pH 2.0~3.0)、玫红色(pH 4.0~7.0)、蓝色(pH 8.0~10.0)、绿色(pH 11.0)	[20]
	紫甘蓝	紫红色(pH 2.0~3.0)、浅紫色(pH 3.0)、浅粉色(pH 4.0~6.0)、紫色(pH 7.0~8.0)、墨绿色(pH 9.0)、绿色(pH 10.0)	[21]
甜菜素	仙人掌果实	橘粉色(pH 2.0~3.0)、粉红色(pH 4.0~7.0)、橘棕色(pH 8.0~9.0)、棕黄色(pH 10.0~11.0)	[22]
姜黄素	姜黄	黄色(pH 3.0~7.0)、橙红色(pH 8.0~11.0)	[23]
	茜草	黄色(pH 2.0~5.0)、橘粉色(pH 4.0~7.0)、黄色(pH 8.0~9.0)、棕色(pH 10.0)、紫色(pH 11.0~12.0)	[24]

1.3 具有良好的抗氧化性

花青素的加入可赋予指示包装一定的抗氧化性,其分子结构中含有多个酚羟基,能够清除活性氧(ROS)、DPPH、ABTS等自由基^[27]。冯永莉等^[28]研究发现,纯基膜(未添加花青素)的自由基清除率很低,加入0.5%桑葚花青素后,指示膜的自由基清除能力达到最高,与纯基膜相比,提高了80%左右。傅雯雯等^[29]将胭脂萝卜花青素加入指示膜中,发现花青素的添加量越大,膜的自由基清除能力越强,最高达95%,加入茶多酚可协同提高自由基的清除能力。Zheng等^[30]制备了一种胶原蛋白/CS/ZnO纳米颗粒和桑葚提取物pH指示膜。通过对比分析发现,

纯基膜抗氧化能力最差,DPPH自由基清除率仅为14.63%,桑葚提取物的加入显著提高了膜的抗氧化能力,自由基的清除能力可达74.80%。

2 负载花青素新鲜度指示膜指示性能的改善

花青素化学性质不稳定,尤其是颜色稳定性不足。光照、温度、氧气以及酶等诸多因素,均会影响花青素的性质^[31],进而影响指示膜的指示性能,制约其在智能包装领域的应用。除此之外,膜载体的选择、载体与花青素的相容性、膜制备方法、成膜液pH等均会影响花青素的显

色性质。

2.1 花青素与膜载体的选择

不同植物来源花青素稳定性及对 pH 敏感性不同。在指示包装领域中,花青素的良好来源有:桑葚、玫瑰花、蓝莓、紫薯、紫甘蓝等,这几种花青素在指示膜中均表现出较好的呈色效果^[6,18-21],它们在不同 pH 环境中,显色明显且区分度高。其中,含矢车菊色素和芍药色素的花青素稳定性更强(如紫薯)^[32-34]。从研发成本角度考虑,像紫薯、紫甘蓝等的花青素,因其原料种植广泛,获取容易,提取成本相对较低,更有利于指示膜的研发及工业化的

生产^[35]。

花青素作为指示剂需要一个稳定的载体来发挥作用,成膜基材就起到了承载、固定和保护花青素的作用,确保指示剂在使用过程中不会渗出,保持光热稳定的性能。所以膜基材同样需要满足安全无毒的条件,同时兼具良好的成膜性能、机械性能和阻隔性能。壳聚糖(chitosan,CS)、聚乙烯醇(polyvinyl alcohol,PVA)、淀粉、海藻酸钠(sodium alginate,SA)、纤维素等材料,因其良好的成膜性和对环境友好可降解的特点,常被用于食品包装中。表 2 总结了常见膜载体材料的特点及成膜优势。

表 2 常见膜载体原料的特点及成膜优势

Table 2 Characteristics and advantages of common raw materials for film carrier

类别	材料	特性及成膜特点	参考文献
多糖类	CS	具有非抗原性、无毒、可生物降解、生物相容性、生物功能、具有成膜能力和抗菌特性	[36]
	SA	成膜性好,对 pH 敏感,与其他材料兼容性好	[37]
	纤维素	化学性质稳定,可进行化学改性,力学性能良好,结晶度高,生物相容性好,可降解	[38]
	淀粉	具有较好的成膜性,所形成的膜具有较好的强度和透明度,价格低	[39]
蛋白质类	明胶	成膜性能良好,机械性能可调,具有较好的生物相容性,可降解,可作为药物载体	[23]
	大豆蛋白	成膜性好,可降解,营养价值高	[40]
合成高分子类	PVA	透明、无毒、可降解,具有优异的机械性能	[41]
	聚乳酸	可降解,具有良好的机械性能和阻隔性能,透明度高,安全性高	[42]

2.2 功能性活性物质的添加

功能性活性物质的加入可改善膜的性质,使指示膜拥有更好的机械性能,同时兼备抗菌、保鲜等功能,满足实际应用的需求。Wang 等^[43]研制了一种负载黑枸杞花青素的 SA-魔芋葡甘露聚糖指示膜,并通过添加茶多酚改善花青素的稳定性。茶多酚与花青素通过氢键与多糖结合,提高了花青素的稳定性,膜的物理和化学性同样得到了显著改善,且茶多酚与花青素之间存在协同抗菌作用。唐森等^[44]研制了一种紫苏精油和 CS 的复合膜,紫苏精油可均匀分布在膜载体各组分之中,使分子间的氢键作用力增强,孔隙率下降,形成更加紧密的网络结构。Rajendran 等^[45]将洋葱花青素包裹于 CS 和肉桂精油中,肉桂精油赋予了薄膜更高的机械强度和抗菌性能。

2.3 指示膜的制备

单一材料制备的指示膜不能完全满足指示包装的要求。如 CS 制膜时存在机械性能、热稳定性和阻水性差的问题^[46-47]。为提高花青素的指示性能,研究人员通常将不同特性的材料进行组合复配制备复合膜,充分发挥各材料的优势。如康星雅等^[48]以 PVA、乳酸链球菌素(Nisin)和 CS 为原料,采用溶液混合和流延法制备复合膜。结果表明,三者之间的相互作用大大改善了膜的性质,Nisin 的加入提高了 PVC 膜的断裂伸长率,CS 改善了 PVA 膜的阻水性能,Nisin 与 CS 的相互作用降低了 PVA 膜

的阻光性能。可以得出,复合膜具有更好的机械性能、阻隔性能、生物相容性和成膜性。对于多层膜的制备,根据应用场景需求,在各层膜中添加不同功能材料,可实现膜多功能的集成。Yue 等^[49]研制了一种具有抗氧化能力的 3 层膜,以 PVA 为保护层,Alhagi sparsifolia 花提取物为抗氧化层,结冷胶为控制活性物质释放层。与相同材料的单层膜相比,3 层结构提高了薄膜的光、水蒸气和氧阻隔能力,以及缓释抗氧化能力,为花青素提供了更优的物理保护,减少了外界因素对花青素的影响。

2.4 花青素在指示膜中的呈色及稳定性的提高

2.4.1 共色素沉着 共色素沉着是指花青素与金属离子和酚类等共色素缔合或形成复合物,使得花青素颜色加深或更稳定的过程^[50]。金属离子通过与花青素的相互作用形成金属螯合物,增强花青素的颜色强度和稳定性,且金属阳离子与成膜基材相互作用可改善膜的物理性质和敏感性^[51]。Ji 等^[51]将 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Ga^{2+} 加到果胶/CMC/花青素基的薄膜中,研究结果显示,金属离子与花青素之间的络合降低了花青素的降解。有机酸与花青素可通过分子间的相互作用、 π - π 堆叠达到共着色的目的。Huang 等^[52]研发了一种含草酸与洛神花青素的共着色指示膜。与原始薄膜相比,草酸与花青素分子间的相互作用形成了更加紧密的网络结构,使得共着色薄膜的呈色和稳定性更强。Li 等^[53]发现单宁酸通过 π - π 堆叠增强了紫薯花

青素的颜色,在此基础上所制备的双层膜在 pH 2.0~12.0 范围有明显颜色变化(从粉红色到黄色),对挥发氨在 2 min 内有快速的响应。

除此之外,花青素与其他天然色素也可作为共色素,两种或多种混合色素在一定程度上更加稳定,显色范围更广,膜的指示效果更精准。苟俏敏等^[54]制备了紫甘蓝—火龙果复合花青素指示膜。火龙果皮中的甜菜素与紫甘蓝花青素共沉着,使溶液的颜色加深。李波等^[55]分别制备了含紫薯花青素和茜素的单色素膜和复合色素膜。茜素的添加提高了紫薯花青素的稳定性,使得复合色素膜拥有更优的机械性能和透光性,指示更准确。

2.4.2 微胶囊化 微胶囊化技术是将花青素与多糖、蛋白质、脂质等壁材结合,使其包埋在微小而密封的胶囊中,提高花青素的稳定性^[56]。目前,可通过喷雾干燥、静电纺丝、凝胶、脂质体颗粒等方法制备微胶囊^[57]。

(1) 喷雾干燥技术:喷雾干燥技术因其高效率、低损失、低成本的特点,成为花青素包封最常用的方法^[58]。当用于微胶囊化目的时,花青素被载体材料覆盖,可保护它们免受环境压力^[59]。现如今,80% 以上的花青素包封采用喷雾包装技术^[60]。Pan 等^[61]研究发现,2% 高甲果胶和 4% 大豆分离蛋白制备的蓝莓花青素微胶囊表现出更优异的控制释放能力和抗氧化稳定性,且在 25, 35 °C 贮藏 6 个月期间表现出最长的半衰期和最低的花青素降解率。现已有研究者将喷雾干燥后的花青素应用于指示包装中。Wu 等^[62]以改性淀粉作为膜基质,加入喷雾干燥微胶囊化处理后的野樱梅花青素。分析发现,在 pH 响应试验中,添加微胶囊花青素薄膜的色差略低于未经喷雾干燥处理花青素薄膜,但其仍具有明显的颜色变化。说明花青素微胶囊化后,在一定程度上保留了其 pH 响应的能力。除此之外,包封还增加了花青素在薄膜中的稳定性,花青素与淀粉基质之间的相容性更强,薄膜拥有更优异的柔韧性和疏水性。

(2) 静电纺丝技术:静电纺丝是一种利用高压静电场使聚合物溶液或熔体纺丝的技术。相比于实验室常用的普通浇筑法或溶液流延法制备的混合膜基质,静电纺丝技术制备的纳米纤维孔隙率高、比表面积大。通过工艺参数调整结构,花青素可与挥发性物质充分反应,灵敏度更高^[63]。研究^[64-66]表明,静电纺丝技术能够电纺出直径在 251~611 nm 超细纤维,封装后的花青素热稳定性更高,在不同的 pH 值环境中均表现出鲜艳的颜色变化。Samira 等^[66]对比分析了静电纺丝纳米纤维和溶液流延法制备的指示膜的性能。结果显示,在 pH 2.0~12.0 范围内,纳米纤维的指示膜展现了从石南紫到绿色的明显的变化,响应更灵敏,响应时间仅为 10 s。Handan 等^[67]开发了负载黑胡萝卜花青素的聚丙交酯纳米纤维膜,其在缓冲溶液中

颜色更鲜明,维持时间也更长。

2.4.3 分子修饰 花青素分子修饰是指通过特定的化学反应或生物酶促反应,对花青素的分子结构进行改变,从而改善其稳定性、溶解性、生物活性等性能的技术。一些研究^[68-69]发现,花青素的酰基化修饰降低了其对水亲核攻击的敏感性,使花青素在指示膜中的光热稳定性提高,但降低了与氨气结合的暴露位点,导致薄膜的响应灵敏度下降。Fei 等^[70]的研究证实了这一说法,马来酸酐化蓝莓花青素可以保护花青素免受羟基的攻击,起到缓冲作用,但是酰化程度越高, NH₃ 诱导的颜色响应滞后时间越长。

3 负载花青素新鲜度指示膜在水产品中的应用

3.1 作用原理及衡量指标

水产品由于自身水分和蛋白质含量高,极易发生腐败变质,产生大量挥发性的碱性气体(如二甲胺、三甲胺等),甚至有毒物质^[71]。这些碱性气体会改变包装环境内的 pH 值,指示膜中的花青素也因 pH 值的改变呈现出不同的颜色^[72],消费者通过肉眼观察指示包装,即可判别水产品的新鲜度。其中,生鲜水产品对新鲜度要求更高、贮藏条件更敏感,指示膜的应用也主要集中在此。

3.2 在生鲜水产品中的应用

3.2.1 在鱼类中的应用 挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)是衡量水产品新鲜度的重要指标之一。水产品腐败所产生氨、胺类等碱性含氮物质的总量称为挥发性盐基氮^[73]。TVB-N 值越高,说明水产品的腐败程度越严重。研究者们大多以 TVB-N 值作为验证指示膜准确性的指标。蒋光阳等^[74]研制了一种以马铃薯淀粉/Na-CMC 基质的紫薯花青素指示膜。在草鱼的新鲜度监测中,鱼肉的 TVB-N 值为 21.55 mg/100 g、pH 为 7.58、菌落总数(TVC)为 7.3 CFU/g 时,指示膜颜色相对应由红色变为蓝紫色。Wu 等^[75]以紫甘蓝花青素和 PVA 为原料制备指示膜,在 25 °C 监测鲫鱼新鲜度时,薄膜颜色由紫色变为紫蓝色,且随着时间的延长,薄膜颜色最终变为黄色。鱼的 TVC 和 TVB-N 也由初始的 4.95 lg (CFU/g) 和 6.30 mg/100 mg 增加到了 7.62 lg (CFU/g), 13.49 mg/100 g,膜颜色的变化与鱼的 TVB-N 和 TVC 相对应。相比淡水鱼,海鱼所携带的微生物具有更强的适应能力和繁殖速度,导致海鱼极易变质。目前已有研究者开发了应用于海鱼(如钝鼻鲷鱼^[76]、鲷鱼^[77]、三文鱼^[78]等)的新鲜度指示膜。邹小波等^[78]以结冷胶和桑葚花青素为原料制备内层膜用于指示三文鱼新鲜度,CS 和 PVA 形成致密隔氧的外层保护膜。在 4 °C 贮藏环境下,随着贮藏时间的延长,三文鱼的 TVB-N 值不断上升,6 d 后,TVB-N 值 > 30 mg/100 g,硫代

巴比妥酸反应产物值为 0.921 mg/kg, pH 为 6.75, 且通过肉眼可以直观看到膜的颜色由暗红变为淡紫色, 最后变成蓝褐色, 鱼肉已经腐败。

3.2.2 在虾中的应用 虾同样是一种富含蛋白质和水分的水产品, 在贮藏过程中容易受到微生物、酶和氧化等因素的影响而发生变质。指示膜的应用原理同鱼类相同。当虾的 TVB-N、TVC 等新鲜度指标分别达到腐败阈值时, 指示膜也会发生相应的颜色变化。Kaewprachu 等^[79]将复合花青素添加到 Na-CMC 基质中制备虾新鲜度的比色指示膜。虾在 4℃ 下贮藏 8 d 和 25℃ 下贮藏 30 h (加速贮藏条件) 期间, 新鲜等级对应指示膜颜色变化: 深紫色 (新鲜)、紫灰色或灰色 (较新鲜), 当指示膜呈橄榄绿色或棕色时, 虾的各项指标已超过新鲜度的阈值, 表明虾已完全变质。

3.2.3 在蟹类、贝类中的应用 指示膜在蟹类和贝类水产中也有应用。Huang 等^[80]制备了一种含桑葚花青素的双层新鲜度指示膜, 用于监测中华绒螯蟹的新鲜度。内膜由桑葚花青素和结冷胶组成, 作为指示层; 外膜由 CS、PVA、SA、支链淀粉组成, 作为隔氧层。中华绒螯蟹不饱和脂肪酸含量高, 通过脂质氧化、蛋白质分解产生异味, 指示膜中花青素与之反应, 发生结构的变化, 使膜呈现不同的颜色。在监测过程中, 蟹的 TVB-N 在第 8 天超过了新鲜度阈值 (31.23 mg/100 g), 内膜经历从粉红色到灰褐色最终转变为深绿色的过程, 肉眼即可判别新鲜度。王欣等^[81]制备了 CS-蓝莓花青素指示膜用于监测花蛤的新鲜度。指示膜在花蛤的冷藏过程中, 具有较好的颜色响应——由淡绿色变为黄绿色。

3.3 在水产制品中的应用

水产制品一般是经过简单或复杂的加工, 货架期相对更长, 更容易保藏。所以, 花青素指示膜在此方面的研究应用相对较少。Sun 等^[82]制备了一种含覆盆子花青素的指示膜用于鱼丸的新鲜度监测, 4℃ 贮藏条件下, 鱼丸的 TVB-N 含量增加, 对应膜的颜色由粉红色变为棕色, 最终变为深绿色。这说明负载花青素的指示膜在水产制品中也有较好的指示作用。

4 展望

负载花青素的指示膜通常由可降解材料制成, 对环境友好, 符合环境可持续发展的要求。指示膜中的花青素能够对特征气体产生颜色响应, 消费者通过观察指示膜颜色的变化即可判别食品的新鲜程度。但花青素的不稳定性使其在制备和应用方面还存在一定的局限性。综上, 负载花青素的指示膜在未来的研究和发展方向有如下几点: ① 提高稳定性和灵敏度。优化花青素的负载方式、成膜工艺以及膜的结构设计等, 提高指示膜在不同环

境条件下的稳定性, 延长其使用寿命。进一步改善花青素的性质以提高指示膜对环境变化的灵敏度和响应速度, 使其能够更准确监测食品的新鲜度。② 开发新型成膜基材。开发新型的天然高分子材料或对现有材料进行改性, 以提高与花青素的相容性和负载能力, 同时增强指示膜的机械强度、阻隔性能。③ 开发多功能指示膜。将花青素与其他功能性的物质结合, 制备多功能的复合指示膜。例如, 与抗菌剂、抗氧化剂等结合, 延长食品的保质期, 防止食品在贮藏和运输过程中受到微生物污染和氧化变质。④ 与其他技术结合, 拓展应用领域。目前, 负载花青素的指示膜的主要应用场景是将膜贴于食品包装内部, 通过颜色变化间接反映食品的新鲜度。未来可将花青素指示膜与其他智能包装技术, 如传感器、射频识别技术等结合, 实现对食品质量的实时监测和追溯, 还可将其用于药品、医疗器械和日用品的包装, 开发更多场景的应用。

参考文献

- [1] WANG C Y, HUANG A X, FANG J X, et al. Development of gelatin/zein electrospun nanofiber films containing purple sweet potato anthocyanin for real-time freshness monitoring of aquatic products[J]. *Coatings*, 2025, 15(1): 79.
- [2] 杨震, 贡慧, 刘梦, 等. 基于电子鼻技术的秋刀鱼新鲜度评价[J]. *肉类研究*, 2017, 31(3): 40-44.
YANG Z, GONG H, LIU M, et al. Freshness evaluation of Pacific saury freshness by electronic nose[J]. *Meat Research*, 2017, 31(3): 40-44.
- [3] 黄维, 吴永军, 王滢, 等. 食品智能包装膜的研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2024(10): 164-168.
HUANG W, WU Y J, WANG Y, et al. Research progress of intelligent packaging membrane for food[J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(10): 164-168.
- [4] 安艳霞, 刘欣, 雷永伟, 等. 生物基活性食品包装材料的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(18): 190-200.
AN Y X, LIU X, LEI Y W, et al. Advance in bio-based active food packaging materials[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(18): 190-200.
- [5] KE F H, LIU D W, QIN J J, et al. Functional pH-sensitive film containing purple sweet potato anthocyanins for pork freshness monitoring and cherry preservation[J]. *Foods*, 2024, 13(5): 736.
- [6] LI Y, HU Z X, HUO R B, et al. Preparation of an indicator film based on pectin, sodium alginate, and xanthan gum containing blueberry anthocyanin extract and its application in blueberry freshness monitoring[J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e14421.
- [7] CHEN K J, LI J, LI L, et al. A pH indicator film based on sodium alginate/gelatin and plum peel extract for monitoring the freshness of chicken[J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102584.
- [8] ÖZGEN S, ÖZBAŞ Z. Multifunctional intelligent packaging

- films incorporated with elderberry anthocyanin for monitoring milk freshness[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 82(3): 1-23.
- [9] LUO Q Y, HOSSEN A, SAMEEN D E, et al. Recent advances in the fabrication of pH-sensitive indicators films and their application for food quality evaluation[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 63(8): 11-17.
- [10] KUSWANDI B, MARYSKA C, JAYUS J, et al. Real time on-package freshness indicator for guavas packaging[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2013, 7(1): 29-39.
- [11] ZHANG J J, ZOU X B, ZHAI X D, et al. Preparation of an intelligent pH film based on biodegradable polymers and roselle anthocyanins for monitoring pork freshness[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 306-312.
- [12] 邢金锋, 王稳航. 天然色素的来源、分类、稳定化及其在可食包装中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 286-295.
- XING J F, WANG W H. Sources, classification, and stabilization of natural pigments and its application in edible packaging[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(13): 286-295.
- [13] 孙建明, 李林林, 刘辉, 等. 花青素基复合材料在食品保鲜及新鲜度指示中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(9): 209-218.
- SUN J M, LI L L, LIU H, et al. Progress on the application of anthocyanin-based composites in food preservation and freshness indication[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(9): 209-218.
- [14] TENA N, MARTÍN J, ASUERO A G. State of the art of anthocyanins: antioxidant activity, sources, bioavailability, and therapeutic effect in human health[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(5): 451.
- [15] ELRASHEID H T, B. H. S H, GUSTAV M K, et al. Smart films fabricated from natural pigments for measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content of meat for freshness evaluation: a systematic review[J]. *Food Chemistry*, 2022, 396: 133674.
- [16] YONG H M, LI U J. Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 26: 100550.
- [17] DE G J F O, CAVALCANTE R A B, DE R B O, et al. The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: a review[J]. *Food Research International*, 2021, 142: 110202.
- [18] NGUYEN T K, TIEN N N T, VO T D H, et al. Comparison between anthocyanins from roselle and mulberry as pH indicators in development of intelligent films[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2024, 18(8): 6 973-6 985.
- [19] WANG C T, LU Y Y, AN X Z, et al. Preparation, characterization, and application of pH-responsive biodegradable intelligent indicator film based on rose anthocyanins[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 200: 116156.
- [20] CHOI I, LEE J Y, LACROIX M, et al. Intelligent pH indicator film composed of agar/potato starch and anthocyanin extracts from purple sweet potato[J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 122-128.
- [21] 王一帆, 刘英健, 玉万国, 等. 明胶/紫甘蓝花青素/纳米二氧化钛指示膜的制备及其在鲜虾保鲜中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(11): 115-124.
- WANG Y F, LIU Y J, YU W G, et al. Gelatin/purple cabbage anthocyanin/nanometer titanium dioxide indicator films: preparation and application in fresh shrimp preservation[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(11): 115-124.
- [22] DODANGE S, SHEKARCHIZADEH H, KADIVAR M. Real-time tracking of fish quality using a cellulose filter paper colorimetric indicator incorporated with prickly pear fruit betacyanins[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 205: 116523.
- [23] ROY S, PRIYADARSHI R, EZATID P, et al. Curcumin and its uses in active and smart food packaging applications-a comprehensive review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 375: 131885.
- [24] CHEN J C, ZHANG J, LIU C, et al. Development of halochromic labels based on binary systems of cationic guar gum and κ -carrageenan loaded with alizarin red S for monitoring milk and seafood freshness[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 156: 110272.
- [25] LI Q Y, CAI P X, XIAO H N, et al. pH-responsive color indicator films based on chitosan and purple yam extract for *in-situ* monitoring food freshness[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103373.
- [26] BAO Y W, CUI H J, TIAN J L, et al. Novel pH sensitivity and colorimetry-enhanced anthocyanin indicator films by chondroitin sulfate co-pigmentation for shrimp freshness monitoring[J]. *Food Control*, 2022, 131: 108441.
- [27] 张淑淑, 吕想, 刘伟, 等. 果蔬花青素的理化特性、提取技术及功能活性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(2): 360-371.
- ZHANG S S, LÜ X, LIU W, et al. Research progress on physicochemical properties, extraction techniques, and functional activities of anthocyanins from fruits and vegetables[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(2): 360-371.
- [28] 冯永莉, 杨晨, 零春甜, 等. 桑葚花青素共混羧甲基纤维素膜的性能研究及应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(13): 1-8.
- FENG Y L, YANG C, LING C T, et al. Research into the properties and applications of mulberry anthocyanins blended with carboxymethyl cellulose film[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(13): 1-8.
- [29] 傅雯雯, 曾小芸, 李静雯, 等. 胭脂萝卜花青素活性智能指示膜的制备及其特性分析[J]. *食品工业*, 2024, 45(3): 45-49.

- FU W W, ZENG X Y, LI J W, et al. Preparation and characterization of anthocyanin-based active intelligent indicator films from rouge carrot[J]. Food Industry, 2024, 45 (3): 45-49.
- [30] ZHENG T T, TANG P P, LI G Y. Development of a pH-sensitive film based on collagen/chitosan/ZnO nanoparticles and mulberry extract for pork freshness monitoring[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134428.
- [31] 崔海鹏, 郭健龙, 王大全, 等. 花青素加工稳定性及其研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 388-397.
- CUI H P, GUO J L, WANG D Q, et al. Stability of anthocyanins during processing and research progress[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 388-397.
- [32] 林好, 陈圻宇, 黄庆谱, 等. 紫薯提取物中花青素的含量测定及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(4): 16-22.
- LIN H, CHEN Q Y, HUANG Q P, et al. Determination of anthocyanin content and antioxidant activity in extracts from purple sweet potato[J]. China Food Additives, 2021, 32(4): 16-22.
- [33] NAZILA G, SOMAYEH H, ZAHRA G. Red cabbage anthocyanins: stability, extraction, biological activities and applications in food systems[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130482.
- [34] LIANG T Q, SUN G H, GAO L L, et al. A pH and NH₃ sensing intelligent film based on *Artemisia sphaerocephala* Krasch gum and red cabbage anthocyanins anchored by carboxymethyl cellulose sodium added as a host complex[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 87: 858-868.
- [35] CHAWLA R, SIVAKUMAR S, KAUR H. Antimicrobial edible films in food packing: current scenario and recent nanotechnological advancements-a review[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 2: 100024.
- [36] CAZÓN P, VÁZQUEZ M. Mechanical and barrier properties of chitosan combined with other components as food packaging film[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18 (2): 257-267.
- [37] YUN D W, LIU J. Preparation, characterization and application of active food packaging films based on sodium alginate and twelve varieties of mandarin peel powder[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2024, 13(8): 1174.
- [38] DANG X G, LI N, YU Z F, et al. Advances in the preparation and application of cellulose-based antimicrobial materials: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 342: 122385.
- [39] 高新, 陈启杰, 踪张扬, 等. 淀粉基功能膜材料的研究进展[J]. 中国造纸学报, 2020, 35(4): 77-82.
- GAO X, CHEN Q J, ZONG Z Y, et al. Research progress of starch - based functional membrane[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2020, 35(4): 77-82.
- [40] LIU B, GAO J, LIU X, et al. Preparation of soybean isolate protein/xanthan gum/agar-*Lycium ruthenicum* anthocyanins intelligent indicator films and its application in mutton preservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283(P3): 137751.
- [41] PHANSAMARNG P, BACCHUS A, HASSAN POUR F, et al. Cationic lignin incorporated polyvinyl alcohol films for packaging applications[J]. Industrial Crops & Products, 2024, 221: 119217.
- [42] WANG H X, DONG J, WANG X Z, et al. An intelligent indicating label using mulberry pigment, polylactic acid and rutile TiO₂ nanoparticle for monitoring the freshness of cold fresh pork[J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104006.
- [43] WANG S C, LI R, HAN M J, et al. Intelligent active films of sodium alginate and konjac glucomannan mixed by *Lycium ruthenicum* anthocyanins and tea polyphenols for milk preservation and freshness monitoring[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(P1): 126674.
- [44] 唐森, 李孟玲, 陈显玲, 等. 紫苏精油壳聚糖复合膜的制备及其对鲜切雪莲果的保鲜效果研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36 (9): 61-65, 83.
- TANG S, LI M L, CHEN X L, et al. Preparation of perilla essential oil chitosan composite film and its preservation effect on fresh-cut yacon[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(9): 61-65, 83.
- [45] RAJENDRAN S, RATHINAM V, KANDASAMY M, et al. An enhanced multifunctional chitosan-based active packaging film reinforced with cinnamon essential oil encapsulating onion peel anthocyanins[J]. Journal of Molecular Structure, 2024, 1316: 138986.
- [46] 闫青青, 朱伟超, 艾延文, 等. 苹果多酚/壳聚糖复合膜的制备及其对冷却牛肉蛋白氧化影响的研究[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 128-134.
- YAN Q Q, ZHU W C, AI Y W, et al. Effect of apple polyphenol/chitosan composite film on quality of chilled beef [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(6): 128-134.
- [47] 齐懿涵, 倪荣, 马晓璐, 等. 壳聚糖复合涂膜对青虾煮制后食用品质的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 34-38.
- QI Y H, NI R, MA X L, et al. Effects of chitosan composite coating on food quality of boiled prawn[J]. The Food Industry, 2022, 43(2): 34-38.
- [48] 康星雅, 乔丽娜, 王楠, 等. Nisin/壳聚糖/聚乙烯醇复合膜的性能及猪肉保鲜应用[J]. 塑料, 2024, 53(2): 11-14, 19.
- KANG X Y, QIAO L N, WANG N, et al. Properties of nisin/chitosan/polyvinyl alcohol composite films and the application in pork preservation[J]. Plastics, 2024, 53(2): 11-14, 19.
- [49] YUE Y J, CHENG X Y, LIU H J, et al. Gellan gum and polyvinyl alcohol based triple-layer films enriched with *Alhagi sparsifolia* flower extract: preparation, characterization, and application of dried shrimp preservation[J]. Foods, 2023, 12 (21): 3979.
- [50] TAN C, DADMOHAMMADI Y, LEE M C, et al. Combination of copigmentation and encapsulation strategies for the

- synergistic stabilization of anthocyanins[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 3 164-3 191.
- [51] JI R, ZHANG X H, CHEN Z, et al. Effect of metal cation crosslinking on the mechanical properties and shrimp freshness monitoring sensitivity of pectin/carboxymethyl cellulose sodium/anthocyanin intelligent films[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 340: 122285.
- [52] HUANG J Y, HU Z H, LI G S, et al. The highly stable indicator film incorporating roselle anthocyanin co-pigmented with oxalic acid: Preparation, characterization and freshness monitoring application[J]. *Food Research International*, 2023, 173(P2): 113416.
- [53] LI R, FENG H Y, WANG S C, et al. A double-layer film based on the strategy of tannic acid-anthocyanin co-pigmentation and tannic-crosslinked-gelatin/-reduced Ag nanoparticles for beef preservation and monitoring[J]. *Food Chemistry*, 2024, 460: 140642.
- [54] 苟俏敏, 郭宗林, 董春娟, 等. 卡拉胶基复合花青素微胶囊指示膜的制备、表征及其对冷鲜牛肉新鲜度的监测[J]. *食品科学*, 2023, 44(9): 154-162.
- GOU Q M, GUO Z L, DONG C J, et al. Preparation and characterization of indicator films based on carrageenan-based microcapsules containing anthocyanins for monitoring the quality of beef during storage[J]. *Food Science*, 2023, 44(9): 154-162.
- [55] 李波, 李文, 杨新, 等. 基于紫薯花青素/茜素的猪肉新鲜度智能指示膜研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(16): 160-168.
- LI B, LI W, YANG X, et al. Development of intelligent indicator films based on purple sweet potato anthocyanin/alizarin for monitoring pork freshness[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(16): 160-168.
- [56] TOLUN A, ALTINTAS Z, ARTIK N. Microencapsulation of grape polyphenols using maltodextrin and gum arabic as two alternative coating materials: development and characterization [J]. *Journal of Biotechnology*, 2016, 239: 23-33.
- [57] RASHWAN A K, KARIM N, XU Y, et al. Potential micro-/nano-encapsulation systems for improving stability and bioavailability of anthocyanins: an updated review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(19): 1-24.
- [58] SILVA P D T J, BORGES H M, SOUZA D C A C, et al. Grape pomace rich-phenolics and anthocyanins extract: production by pressurized liquid extraction in intermittent process and encapsulation by spray-drying[J]. *Foods*, 2024, 13(2): 279.
- [59] SHISHIR R I M, XIE L H, SUN C D, et al. Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 78: 34-60.
- [60] SHARIF N, KHOSHNOUDI-NIA S, JAFARI S M. Nano/microencapsulation of anthocyanins; a systematic review and meta-analysis[J]. *Food Research International*, 2020, 132: 109077.
- [61] PAN L H, CHEN L P, WU C L, et al. Microencapsulation of blueberry anthocyanins by spray drying with soy protein isolates/high methyl pectin combination: physicochemical properties, release behavior in vitro and storage stability[J]. *Food Chemistry*, 2022, 395: 133626.
- [62] WU X L, YAN X X, ZHANG J W, et al. Intelligent films based on dual-modified starch and microencapsulated *Aronia melanocarpa* anthocyanins: functionality, stability and application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 275(P1): 134076.
- [63] LEIDY R, MARI A XIMENA QC. Use of electrospinning technique to produce nanofibres for food industries: a perspective from regulations to characterisations[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 92-106.
- [64] LUCIANA P, ZANELLA V P, MELLO L S H E, et al. Ultrafine fibers of zein and anthocyanins as natural pH indicator[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(7): 2 735-2 741.
- [65] DA CRUZ E P, JANSEN E T, FONSECA L M, et al. Red onion skin extract rich in flavonoids encapsulated in ultrafine fibers of sweet potato starch by electrospinning[J]. *Food Chemistry*, 2023, 406: 134954.
- [66] SAMIRA F, FARIBA Z, HADI A, et al. Characterization of electrospun nanofibers and solvent-casted films based on *Centaurea arvensis* anthocyanin-loaded PVA/κ -carrageenan and comparing their performance as colorimetric pH indicator [J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 133057.
- [67] HANDAN P, BURÇAK K K. Fabrication and characterization of biobased electrospun pH indicators from black carrot anthocyanin-loaded polylactide[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 39: 101154.
- [68] 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): 6 211-6 215.
- JIA D T, LU L X, PAN L, et al. Preparation and study of modified roseue anthocyanin-coated polypropylene freshness indicator film[J]. *Journal of Functional Materials*, 2019, 50(6): 6 211-6 215.
- [69] 张俊俊, 邹小波, 宋文君, 等. 基于酰基化花青素的高稳定性新鲜度可视化指示膜及其应用[J]. *食品科学*, 2023, 44(3): 194-200.
- ZHANG J J, ZOU X B, SONG W J, et al. Development and application of visual freshness indicator film with high stability based on acylated anthocyanins[J]. *Food Science*, 2023, 44(3): 194-200.
- [70] FEI P, ZENG F S, ZHENG S Y, et al. Acylation of blueberry anthocyanins with maleic acid: improvement of the stability and its application potential in intelligent color indicator packing materials[J]. *Dyes and Pigments*, 2021, 184: 108852.

- [71] 刘亚楠, 李欢, 蒋凡, 等. 基于活性包装视角下的水产品保鲜机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 285-291.
- LIU Y N, LI H, JIANG F, et al. Progress in research on the preservation mechanism of aquatic products from the perspective of active packaging[J]. Food Science, 2022, 43(13): 285-291.
- [72] ZHANG X, LIU W J, LI C W. A double-sided coating paper antibacterial indicator card based on polyvinyl alcohol/sodium carboxymethyl cellulose-anthocyanins and chitosan-halloysite nanotubes loaded essential oil to monitor fish freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278 (P2): 134716.
- [73] 王超, 刘言, 夏珍珍, 等. 基于近红外光谱技术的小龙虾新鲜度快速检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(1): 156-161.
- WANG C, LIU Y, XIA Z Z, et al. Fast evaluation of freshness in crayfish (*Prokaryophyllus clarkii*) based on near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(1): 156-161.
- [74] 蒋光阳, 侯晓艳, 任文, 等. 淀粉-羧甲基纤维素钠-花青素指示膜的制备及在鱼肉鲜度指示中的应用[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 250-258.
- JIANG G Y, HOU X Y, REN W, et al. Preparation of indicator films based on sodium carboxymethyl cellulose/starch and purple sweet potato anthocyanins for monitoring fish freshness[J]. Food Science, 2020, 41(12): 250-258.
- [75] WU H J, JIAO C, LI S S, et al. A facile strategy for development of pHsensing indicator films based on red cabbage puree and polyvinyl alcohol for monitoring fish freshness[J]. Foods, 2022, 11(21): 3 371.
- [76] ZHENG R Y, LIAO G M, KANG J J, et al. An intelligent myofibrillar protein film for monitoring fish freshness by recognizing differences in anthocyanin (*Lycium ruthenicum*)-induced color change[J]. Food Research International, 2024, 192: 114777.
- [77] 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 L X, JIA D T, PAN L. Development of freshness indicator film based on modified roseue anthocyanin and its application in catfish packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 1-6.
- [78] 邹小波, 薛瑾, 黄晓玮, 等. 一种双层智能膜的制备及在指示三文鱼新鲜度中的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 206-212.
- ZOU X B, XUE J, HUANG X W, et al. Development and application of an intelligent biolayer packaging film as a freshness indicator for salmon[J]. Food Science, 2019, 40(23): 206-212.
- [79] KAEWPRACHU P, JAISAN C, RAWDKUEN S, et al. Colorimetric indicator films based on carboxymethyl cellulose and anthocyanins as a visual indicator for shrimp freshness tracking[J]. Heliyon, 2024, 10(11): e31527.
- [80] HUANG X W, DU L Z, LI Z H, et al. A visual bi-layer indicator based on mulberry anthocyanins with high stability for monitoring Chinese mitten crab freshness[J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135497.
- [81] 王欣, 李婷婷, 冯龙斐, 等. 负载蓝莓花青素的壳聚糖基智能指示膜监测花蛤新鲜度的研究[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 10-19.
- WANG X, LI T T, FENG L F, et al. Chitosan-based smart indicator film loaded with blueberry anthocyanins for monitoring clam freshness[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(11): 10-19.
- [82] SUN Y N, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Double-layer indicator films aided by BP-ANN-enabled freshness detection on packaged meat products[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 31: 100808.