DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.81033

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

孙建明[1,2] 李林林[1] 刘 辉[1,2] 曹前荣[1] 王楚凯[1]

（1.河南科技大学包装工程系,河南 洛阳 471000;
2.河南省智能与防护包装设计工程研究中心,河南 洛阳 471000）

摘要:花青素是一种植物源水溶性色素,绿色安全,不仅有优异的抗氧化性和抑菌性,还具有优异的pH响应性。文章从花青素的结构及生物活性出发,重点综述了花青素在食品保鲜包装和新鲜度指示领域中的研究进展,深入分析了花青素基复合薄膜和微胶囊以及花青素基新鲜度指示标签的应用现状和发展趋势。

关键词:花青素;复合材料;保鲜包装;指示标签

Progress on the application of anthocyanin-based composites in food preservation and freshness indication

SUN Jianming[1,2] *LI Linlin*[1] *LIU Hui*[1,2] *CAO Qianrong*[1] *WANG Chukai*[1]

（1. *Department of Packaging Engineering*, *School of Art & Design*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang*, *Henan* 471000, *China*; 2. *Henan Intelligent and Protective Packaging Design Engineering Research Center*, *Luoyang*, *Henan* 471000, *China*）

Abstract: Anthocyanin is a kind of green and safe water-soluble pigment from plants, has excellent antioxidant and antibacterial properties, as well as sensitive pH response. Based on the structure and biological activity of anthocyanins, this review focused on the research progress of anthocyanins in the field of food preservation packaging and freshness indication, and analyzed the application status and development trend of anthocyanin-based composite films and microcapsules as well as anthocyanin-based freshness indication labels.

Keywords: anthocyanins; composite materials; fresh-keeping packaging; indicating labels

消费者往往以食品包装袋上的保质期作为判断食品新鲜度的标准,但对部分食品而言,这种评估方法效果欠佳[1],而且部分食品腐败变质后无法通过感官直接判定,需进一步进行理化指标测定。传统食品新鲜度理化指标检测需专业人员操作,且检测成本较高[2]。因此,在开发能够延长食品保质期的保鲜包装的同时,亟须开发高效快速、灵敏度高的食品新鲜度检测方法。花青素作为一种植物源色素,绿色安全,具有较强的抗氧化性和抑菌性,在不同的pH条件下呈现不同的颜色,具有优异的pH响应性。因此,花青素基复合材料成为食品保鲜和新鲜度指示领域研究热点之一。

文章从花青素的来源、特性及分子结构出发,分析花青素颜色变化丰富的原因,并介绍不同pH环境条件下花青素结构之间的相互转化。在此基础上,系统综述花青素基复合材料在食品保鲜中的应用,主要体现在花青素基复合薄膜和花青素基微胶囊食品保鲜领域的研究进展;此外,还论述花青素基复合材料在肉制品、水产品、奶制品新鲜度指示中的应用研究进展,并分析花青素基复合材料实现工业化生产及大规模应用需注意的问题。

1 花青素概况

1.1 花青素来源及特性

花青素,又称花色苷,是植物中广泛存在的一种色

基金项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)基金资助项目(编号:222102110161);河南科技大学第十一届研究生创新基金资助项目(编号:CCJJ-2022-KJ08)

通信作者:孙建明(1978—),男,河南科技大学副教授,博士。E-mail: sunjianming@haust.edu.cn

收稿日期:2023-10-17 **改回日期:**2024-05-27

素[3]，如蓝莓[4−5]、黑莓[6]、桑葚[7]、玫瑰茄[8]等。目前科研人员从植物中已经鉴定出的花青素超过700种，由于花青素最小单元可与多种糖类或有机酸结合形成不同花青素，因此其种类、数量仍在持续增加[9]。

花青素为类黄酮酚类化合物，具有抗氧化[10]、抑菌[11]等多种作用。研究[12−13]发现，花青素抗氧化活性与其结构特征密切相关，如花青素种类、糖基化或糖基酰化的位置和数量，而其作为目前最高效的天然抗氧化剂，抗氧化性比抗坏血酸要高20倍[14−16]；同时，花青素还可通过破坏细菌蛋白质完整性或直接破坏细菌细胞膜起到抑菌效果[17−18]。

1.2　花青素分子结构

花青素的基本结构为3，5，7-三羟基-2-苯基苯并吡咯，由两个苯甲酰环（A环和B环）和一个含氧六元杂环（C环）组成，构成C_6—C_3—C_6的基本骨架[19]，见图1。

其中，B环上的R_1和R_2均可被不同取代基取代，植物中最常见的有6类基本花青素[20]，即天竺葵色素（pelargonidin，Pg）、矢车菊素（cyanidin，Cy）、芍药色素（peonidin，Pn）、飞燕草色素（delphinidin，Dp）、矮牵牛色素（petunidin，Pt）、锦葵色素（malvidin，Mv），见表1。其中，Cy在植物中占比最高，可达50%；Pg、Cy和Dp属于非甲基化花青素，在自然界分布最广泛。

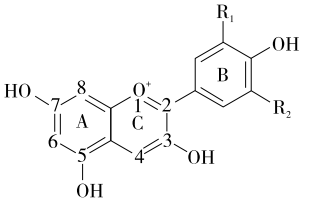

图1　花青素基本结构

Figure 1　Basic structure of anthocyanins

表1　植物中6类基本花青素

Table 1　Six common anthocyanins in plants

花青素种类	R_1	R_2	相对分子质量	植物中占比/%	颜色	类别
Pg	—H	—H	302.68	12	橙红色	非甲基化
Cy	—OH	—H	408.44	50	红紫色	非甲基化
Pn	—OCH_3	—H	336.72	12	洋红色	甲基化
Dp	—OH	—OH	338.69	12	蓝红色	非甲基化
Pt	—OCH_3	—OH	352.72	7	暗红色或紫色	甲基化
Mv	—OCH_3	—OCH_3	365.80	7	紫色	甲基化

1.3　花青素变色机理

花青素分子结构中含有高分子共轭体系，易溶于水，B环取代基和额外羟基会影响花青素的稳定性[21]，导致花青素在不同的pH环境中呈不同的颜色。研究[22−23]表明，花青素颜色变化丰富主要有3个方面：① 由于花青素含有苯环和吡咯环，环的共轭结构可以使花青素分子吸收特定波长的光线；② 因为花青素分子中的羟基、糖基、甲氧基等官能团影响其吸收光谱和颜色，如花青素分子中的羟基可以使其吸收波长更长的光线，从而呈红色或者橙色；③ 花青素的颜色会随着周围环境的变化而变化。

在pH值一定的环境中，黄烊盐阳离子、琨式碱、甲醇假碱以及查尔酮4种离子在花青素中共存，图2为花青素分子结构之间的相互转变。然而它们易受到酸碱环境的影响，在pH值较小的环境中，黄烊盐阳离子为溶液中的主要物质，此时溶液以红色为主，随着pH值的增大，花青素中的阳离子发生水合变成无色的甲醇假碱，或者开环变成无色或淡黄色的查尔酮，当pH值继续增大至溶液呈碱性时，黄烊盐阳离子发生质子转移，溶液中琨式碱逐渐增加，此时颜色主要以琨式碱蓝色为主[24]。但是，花青素中的结构之间相互转变不仅与pH值有关，还会受到不同花青素结构的特定影响[25]。

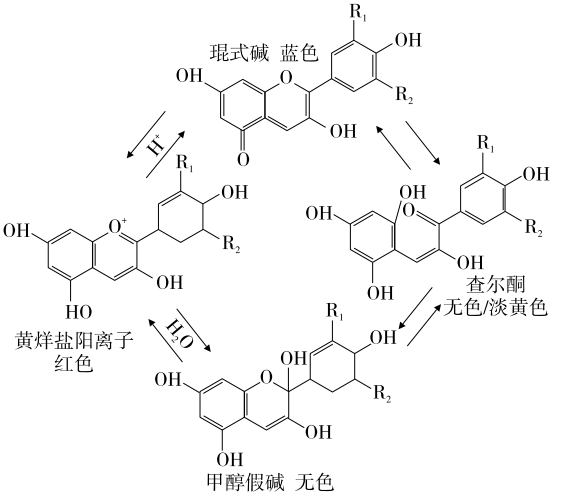

图2　花青素分子结构的互相转变

Figure 2　Interconversion of anthocyanin molecular structures

2　在食品保鲜包装中的应用

单独采用某种花青素可以在一定程度上延长食品保

质期,但当其与一些食品添加剂,如苯甲酸钠、山梨酸钾、对羟基苯甲酸乙酯等复配后,保鲜效果会更优异,见表2。目前,将花青素与天然高分子材料复合制成花青素基复合材料是主要研究方向。食品保鲜领域应用最为常见的两种花青素基复合材料主要包括花青素基复合薄膜和花青素基微胶囊。

表2　单一花青素及花青素复合食品添加剂材料对食品保鲜效果的影响

Table 2　Effects of single anthocyanin and anthocyanin compound food additive materials on food preservation

花青素	试验温度/℃	试验对象	考察指标	保鲜效果	参考文献
葡萄籽原花青素	4	大黄鱼片	丙二醛值、K值、肌红蛋白含量、半胱天冬酶活性、总谷胱甘肽含量	0.2%葡萄籽原花青素延长货架期3~5 d	[26]
葡萄籽原花青素	4	青州蜜桃	腐烂指数、失重率、硬度、呼吸强度、含糖量	3 g/L的葡萄籽原花青素保鲜效果最好	[27]
紫薯花青素	25	柑橘	失重率、腐烂率	花青素+苯甲酸钠＞苯甲酸钠＞花青素＞对照	[28]
茄子皮花青素	25	荔枝	失重率、腐败率、可溶性固形物	花青素+山梨酸钾＞0.05%山梨酸钾＞1%花青素＞对照	[29]
紫色马铃薯花青素	26	草莓	失重率、腐败率、可溶性固形物	花青素+对羟基苯甲酸乙酯＞对羟基苯甲酸乙酯＞花青素＞对照	[30]

2.1　花青素基复合薄膜

花青素基复合薄膜一般以天然高分子材料为成膜基体,以花青素为功能性材料,通过流延法[31]、溶液浇铸法[32]及静电纺丝法[33]等制备。天然高分子材料来源主要包括淀粉、纤维素、壳聚糖和蛋白质等。

将花青素加入天然高分子材料后,复合薄膜的抗氧化性、抑菌性等性能均会有所提高,如Li等[34]制备了桑葚花青素/木薯淀粉/月桂醇精酸乙酯复合薄膜,发现桑葚花青素的加入可以有效提高复合薄膜的抗紫外线性能。张莉等[35]利用壳聚糖接枝原花青素衍生物,通过喷涂法制备了壳聚糖原花青素负载氧化石墨烯薄膜,以奶酪为试验对象,发现该复合膜有更高的抗氧化性和抑菌性,且其包装的奶酪较PE膜能够延长贮藏时间16 d。Li等[36]利用静电纺丝法开发了一种双层指示膜,外层材料为氧化海藻酸钠/羧甲基壳聚糖包合紫叶酢浆草花青素,内层膜材料为明胶/玉米蛋白包合芳樟醇,发现25 ℃条件下,以外层膜密封装有200 mL牛奶的奶瓶,该材料可以延长牛奶保质期1倍。花青素复合薄膜对食品保鲜效果的影响见表3。

表3　花青素基复合薄膜对食品保鲜效果的影响

Table 3　Effects of anthocyanin-based composite film on food preservation

花青素	成膜基体	接触方式	试验温度/℃	包装对象	保鲜效果	参考文献
晋黑糯玉米花青素	壳聚糖	涂膜	4	冷鲜肉	壳聚糖复配0.6 mg/L花青素抗氧化保鲜效果最佳,可有效减缓肉样腐败	[37]
玫瑰茄花青素	聚乙烯醇/淀粉	包裹	4	猪肉	玫瑰茄色素的释放可有效抑制猪肉脂肪的氧化,有明显的抑菌作用,贮藏10 d后,细菌总数(TVC)值最低为6.80 lg (CFU/g)	[38]
葡萄籽原花青素	壳聚糖/纳米颗粒	包裹	4	草鱼片	复合膜具有更好的抗菌、抗氧化和阻隔氧气的性能,对鱼肉具有更好的保鲜效果	[39]
萝卜花青素	琼脂/TiO_2/印楝精油	包裹	25	香蕉	对霉菌和酵母菌有一定的抑制作用,可以较好地维持香蕉的感官品质、减缓香蕉水分的流失,较好地保持其硬度	[40]
接骨木花青素	魔芋葡甘聚糖/壳聚糖	包裹	25	奶酪	奶酪硬度显著低于对照组,失重率显著高于对照组,有一定的保鲜效果	[41]

2.2　花青素基微胶囊

由于花青素在提取后极易受到光照[42]、温度[43]、酶活性[44]等因素的影响,稳定性较低。研究[45]发现,花青素微胶囊化后在一定程度上可以提高花青素的稳定性。纪秀凤[46]发现红树莓籽低聚原花青素微胶囊化后保留率可以提高1.90%。花青素基微胶囊制备方法有锐孔法[47]、复合凝聚法[48]、喷雾干燥法[49]等,是提高生物活性物质稳定性和控制释放最有效的途径,具有成本低、可持续性高、制

备时间短等优点[50]。

此外，将花青素基微胶囊化后仍具有一定的抗氧化性和抑菌性，李星宇等[51]发现质量浓度 84 μg/mL 的海藻酸钠/壳聚糖载花青素微胶囊对羟自由基清除率可以达到 50%。花青素基微胶囊在食品保鲜领域研究有广阔的应用前景，Rashid 等[52]以麦芽糊精为载体制备的蝶豆花青素微胶囊对革兰氏菌有广谱抑菌作用，其中对大肠杆菌的 MIC 和 MBC 最低，将其应用在松饼上，发现其对食源性细菌有明显的抑菌作用，且该花青素可以延长松饼等烘烤食品的保质期；宋佳琳[53]研究发现，葡萄籽原花青素微胶囊为 10 g/kg 时，不仅可以改善鸡肉肠的色泽和质构，同时，鸡肉肠的硫代巴比妥酸值为 1.34 mg MDA/kg 肠、巯基值为 103.39 μmol SH/g 蛋白，表现出较强的抗氧化作用。

综上，花青素基复合材料以其优异的抗氧化性和抑菌性应用于保鲜包装中，但是在研究中应注意以下问题：

（1）食品安全测试。为了最大程度保证人类的健康，研究应充分考虑花青素基复合材料中成分的挥发和迁移对食品造成的潜在影响，如增加迁移测试或安全毒理性评价等。有学者[54]研究发现，花青素迁移量极少且其他成分均在国家标准相关要求范围内，不仅不会对牛奶安全造成影响，还可以在增加食品营养特性的基础上，提高其抗氧化特性，延长贮藏时间。

（2）释放动力学研究。花青素基复合材料中花青素的释放动力学研究较少，需要深入研究不同花青素基复合材料的释放规律，建立相关释放模型。

（3）认可度。由于气味、色彩等原因，应考虑公众对花青素的使用是否接受。Morsy 等[55]研究发现，花青素微胶囊在增强草莓花蜜的感官特性的同时可以被 80% 的人接受，商业认可度较高。

（4）稳定性。花青素易受到外界因素的影响，尤其是制备复合薄膜时，由于制膜方式的差异，如热挤出法等也会使花青素发生高温变性[56]，而花青素微胶囊化后可以有效改善花青素稳定性。

3　在食品新鲜度指示中的应用

当前，针对部分消费者而言，食品包装袋上生产日期、保质期等标识不够醒目，难以识别[57]。为此，欧美相继推出 Nutri-Score 营养等级标签[58]、最佳食用期标签[59]等，将食品购买权完全交给消费者。食品新鲜度指示是指通过可见的颜色变化直接监测食品的腐败变质和新鲜度状态[60]，具有成本低廉、无损性以及瞬时响应性[61]。花青素基新鲜度指示标签制备见图 3。目前，花青素基新鲜度指示标签常用于肉制品[62]、水产品[63]以及奶制品[64]中，其中在肉制品新鲜度指示中应用最为广泛，针对这 3 类食品的花青素基新鲜度指示标签检测方式主要包含接触式和非接触式两种。

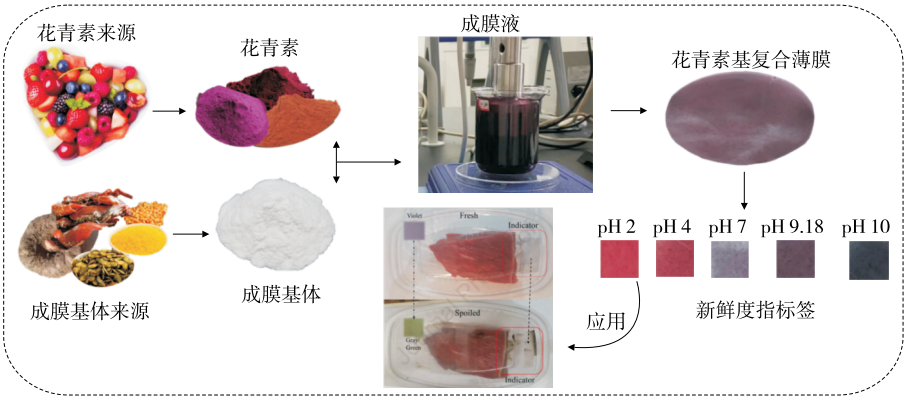

图 3　花青素基新鲜度指示标签制备流程

Figure 3　Anthocyanin-based freshness indicator label preparation process

3.1　肉制品

肉制品在腐败过程中，组织中蛋白质和非蛋白质含氮化合物、不饱和脂肪酸含量高，随着贮藏时间的延长，该类物质易发生氧化水解，生成总挥发性盐基氮(TVB-N)，导致 pH 值的变化。为减少肉制品运输、贮藏等环节腐败变质造成的经济损失，具有无损新鲜度检测的指示标签成为新鲜度检测潜在产品。花青素基新鲜度指示标签在肉制品中的应用见表 4。

3.2　水产品

水产品含水量高，易在微生物和酶促反应的共同作用下发生腐败变质，鱼虾类会因三甲胺等挥发性含氮化合物的产生造成包装内环境改变。花青素基新鲜度指示标签在水产品中的应用见表 5。随着水产品贮藏时间的延长，标签颜色会根据 pH 的变化发生颜色变化，色差值也逐渐增大，对水产品新鲜度指示友好。

3.3　奶制品

奶制品为液体，保质期仅 3~10 d。变质初期乳糖等酸化为乳酸，导致 pH 降低，随贮藏时间延长，蛋白会慢慢“絮凝”，进而导致蛋白质分解，产生挥发性含氮化合物。花青素基新鲜度指示标签在奶制品中的应用见表 6。

表4　花青素基新鲜度指示标签在肉制品中的应用†

Table 4　Application of anthocyanin-based freshness indicator labels in meat products

试验对象	花青素	基材	试验温度/℃	是否接触	应用方式	颜色变化	参考文献
猪肉	紫苏	醋酸纤维素	25	是	覆盖	玫瑰红—粉色—浅粉色—蓝紫色—浅黄—黄色	[65]
猪肉	黑米糠	壳聚糖/牛至精油	4	是	覆盖	红色—绿色	[66]
猪肉	树莓	果胶/海藻酸钠/黄原胶	25	是	覆盖	红色—蓝色—褐色	[67]
鸡肉片	紫罗勒	牛明胶	25	是	包裹	红蓝色—红黄色—黄绿色	[68]
鸡胸肉糜	花青素/姜黄素	魔芋葡甘聚糖/卡拉胶	25	否	顶空	/	[69]
羊肉	藏红花	壳聚糖纳米纤维/甲基纤维素	25	否	顶空	紫色—绿色	[70]

†　/表示文献中未涉及。

表5　花青素基新鲜度指示标签在水产品中的应用

Table 5　Application of anthocyanin-based freshness indicator label in aquatic products

试验对象	花青素	基材	试验条件	是否接触	应用方式	颜色变化	参考文献
虾	紫薯	TEMPO氧化细菌纤维素	25 ℃,75% RH	否	顶空	红色—暗紫色	[71]
虾	漆树	果胶/壳聚糖	25 ℃	否	顶空	浅红色—黄绿色	[72]
虾	玫瑰	聚乙烯醇/羟丙基甲基纤维素	4 ℃,50% RH	否	顶空	玫瑰红—浅绿色—浅黄色	[73]
虾	蝶豆	琼脂/角叉菜胶	4 ℃	否	顶空	蓝紫色—深蓝色—黄绿色	[74]
花蛤	蓝莓	壳聚糖	4 ℃	否	顶空	浅绿色—深绿色—黄绿色	[75]
鲳鱼	玫瑰茄	聚乙烯醇/聚丙烯	4 ℃	否	顶空	深红色—淡紫色—浅绿色	[76]

表6　花青素基新鲜度指示标签在奶制品中的应用

Table 6　Application of anthocyanin-based freshness indicator label in dairy products

试验对象	花青素	基材	试验温度/℃	是否接触	应用方式	颜色变化	参考文献
牛奶	紫叶酢浆草	氧化海藻酸钠/羧甲基壳聚糖	25	否	顶空	草绿色—浅棕色	[36]
牛奶	枸杞	海藻酸钠/魔芋葡甘聚糖	20	否	顶空	红棕色—黄绿色	[77]
巴氏杀菌乳	紫甘蓝	大豆分离蛋白	37±2	否	顶空	蓝紫色—青色—红色	[78]
牛奶	蝶豆	结冷胶	15	是	浸泡	蓝色—深紫色—粉紫色(图黑白)	[79]
豆浆	番茄 黑枸杞	壳聚糖	25	是	浸泡	10%番茄花青素:浅绿—浅黄—粉色 10%黑枸杞花青素:墨绿—浅黄—粉紫	[80]

整体上,花青素基新鲜度指示标签在食品新鲜度指示中具有良好的应用前景,但是在研究中应注意以下问题:

(1)花青素选择。不同花青素的来源不同,所含活性物质如总酚含量差异显著,对标签抗氧化性及pH敏感性影响较大。由表4~表6可知,肉制品、水产品检测所需的花青素以红色系为主,如紫苏花青素、树莓花青素等,奶制品则以黄绿色系为主,如紫叶酢浆草花青素和紫甘蓝花青素等。

(2)检测方式选择。不同食品物理形态不同,所含营养成分不同,在不同的环境下发生腐败变质产生的物质也不同。由表4~表6可知,因为肉制品的检测一般以10~15 g小块去皮为主,所以可采用多种方式进行检测;而水产品一般为完整的个体,有"外衣"保护,腐败后产生的挥发性含氮化合物在顶空标签下效果更明显;奶制品有顶空和浸泡两种方式,考虑到顾客的接受度,建议未来研究以顶空为主。

(3)共着色作用。共着色作用指类黄酮化合物与花青素一起呈现增色效应,不仅可以增加花青素的稳定性,还可以加深颜色,以提高花青素基新鲜度指示标签在不同pH环境中的色彩丰富度,进一步实现精准的人眼判别。如添加茶多酚等酚类物质通过黄酮醇、糖苷等易引

发共着色效应。

（4）灵敏性测试。应对花青素基新鲜度指示标签的灵敏性进一步研究，如通过添加纳米材料或其他新型添加剂等。只有指示标签快速高效地对食品腐败气体作出反应，才能及时对食品的质量作出判断。

4 结语

基于花青素原料易得、绿色安全、抑菌性良好、抗氧化性以及优异的pH响应性特点，花青素基复合材料是兼具食品保鲜和新鲜度指示功能的多用途理想材料，不仅在理论研究方面有重要的意义，在食品工业生产中也具有极大的应用价值，但是在实现工业化生产及大规模应用中应注意以下问题：

（1）现有花青素基复合薄膜的成膜基材以亲水性材料为主，后续研究可以尝试引入疏水性较强的基材，以改善其机械强度、阻隔性等性能，进一步扩大花青素基复合材料的应用范围。

（2）目前，花青素基新鲜度指示标签的应用研究大部分以肉制品、水产品为主，应加强花青素基新鲜度指示标签在果蔬类食品中的应用研究。尤其是针对来源于某种水果的花青素和水果本身之间的作用机制的研究甚少。

（3）现在针对花青素基复合材料的研究仍然以实验室为主，各种研究配方中的比例不够成熟，其工艺及成本造成难以在市场上大规模应用，应通过研究固定其配方比例，并使其标准化，以适应工业化大规模生产。

参考文献

[1] 王凯, 付红军, 彭湘莲. 花青素—壳聚糖基新鲜度指示膜的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 365-371.
WANG K, FU H J, PENG X L. Progress of anthocyanin-chitosan-based freshness indicator films[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 365-371.

[2] 田卫新, 何丹丹, 杨东, 等. 一种基于高光谱图像的熟牛肉TVB-N含量预测方法[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 70-74.
TIAN W X, HE D D, YANG D, et al. A hyperspectral image-based method for predicting TVB-N content of cooked beef[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 70-74.

[3] 龚燕川, 陈芳慧, 符东, 等. 海藻酸钠涂膜处理对香椿贮藏品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(17): 158-161, 172.
GONG Y C, CHEN F H, FU D, et al. Effect of sodium alginate coating treatment on the storage quality of Toona sinensis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(17): 158-161, 172.

[4] WU Y Q, HAN T Y, YANG H, et al. Known and potential health benefits and mechanisms of blueberry anthocyanins: a review [J]. Food Bioscience, 2023, 55: 103050.

[5] TAN S, LAN X, CHEN S, et al. Physical character, total polyphenols, anthocyanin profile and antioxidant activity of red cabbage as affected by five processing methods[J]. Food Research International, 2023, 169: 112929.

[6] LIU H, ZHOU K, JIANG H Q, et al. Current advances in anthocyanins: structure, bioactivity and human health[J]. Journal of Food & Nutrition Research, 2021, 60(3): 203-216.

[7] 戴文娜, 项威, 梁好. 食物中花青素的研究进展[J]. 芜湖职业技术学院学报, 2023, 25(3): 47-50.
DAI W N, XIANG W, LIANG H. Research progress of anthocyanins in food[J]. Journal of Wuhu Institute of Technology, 2023, 25(3): 47-50.

[8] 赵敏, 钟继超, 李泽璠, 等. 玫瑰茄色素的稳定性及其抗氧化活性研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 15-19.
ZHAO M, ZHONG J C, LI Z F, et al. Study on the stability of pigments and their antioxidant activity in rosehips[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 15-19.

[9] XUE H K, SANG Y M, GAO Y C, et al. Research progress on absorption, metabolism, and biological activities of anthocyanins in berries: a review[J]. Antioxidants, 2022, 12 (1): 3.

[10] 徐春明, 庞高阳, 李婷. 花青素的生理活性研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2013(3): 205-210.
XU C M, PANG G Y, LI T. Progress of physiological activity of anthocyanins[J]. China Food Additives, 2013(3): 205-210.

[11] 许建兰, 赵永富, 马瑞娟, 等. 高透气性果袋对桃果实微域环境和品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(5): 1 233-1 239.
XU J L, ZHAO Y F, MA R J, et al. Effects of high air permeability fruit bags on microdomain environment and quality of peach fruit[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(5): 1 233-1 239.

[12] 刘鹤, 孙杰, 费晓伟, 等. 原花青素生理功效和分析研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 211-217.
LIU H, SUN J, FEI X W, et al. Advances in physiological efficacy and analytical studies of proanthocyanidins[J]. Food Research and Development, 2023, 44(12): 211-217.

[13] 谢京颖, 王雅荭, 高彦祥. 食品活性包装研究现状[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(9): 304-315.
XIE J Y, WANG Y H, GAO Y X. Current status of research on food active packaging[J]. China Food Additives, 2023, 34(9): 304-315.

[14] 吴春燕, 蔡敏, 廖如樱. 正交试验优化黑米原花青素的提取工艺及其抗氧化性研究[J]. 山东化工, 2023, 52(13): 10-13.
WU C Y, CAI M, LIAO R Y. Orthogonal test to optimize the extraction process of black rice proanthocyanidins and its antioxidant property[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52 (13): 10-13.

[15] 张星和, 杨晓娜, 邹章玉, 等. 火棘果原花青素的提取优化与抗氧化活性研究[J]. 保山学院学报, 2022, 41(5): 19-27.
ZHANG X H, YANG X N, ZOU Z Y, et al. Optimization of extraction and antioxidant activity of proanthocyanidins from sea buckthorn fruit[J]. Journal of Baoshan University, 2022, 41

(5): 19-27.

[16] 李煦, 白雪晴, 刘长霞, 等. 天然花青素的抗氧化机制及功能活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8 163-8 171.
LI X, BAI X Q, LIU C X, et al. Progress of antioxidant mechanism and functional activity of natural anthocyanins[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(20): 8 163-8 171.

[17] 董闪闪. DBD等离子体对鲜切苹果微生物及多酚氧化酶的失活作用及机制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022: 2-5.
DONG S S. Inactivation effect and mechanism of DBD plasma on microorganisms and polyphenol oxidase in fresh-cut apples [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022: 2-5.

[18] 殷夏伟. 黑果腺肋花楸果渣综合利用技术研究[D]. 合肥: 合肥学院, 2022: 4-6.
YIN X W. Comprehensive utilization of black-fruited rowan pomace[D]. Hefei: Hefei University, 2022: 4-6.

[19] SHOMALI A, DAS S, ARIF N, et al. Diverse physiological roles of flavonoids in plant environmental stress responses and tolerance[J]. Plants, 2022, 11(22): 3 158.

[20] 谌金吾. 紫甘薯HPLC指纹图谱建立及抗氧化活性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 2-3.
CHEN J W. Establishment of HPLC fingerprint and antioxidant activity of purple sweet potato[D]. Chongqing: Southwest University, 2010: 2-3.

[21] 高媛, 李辰钰, 李春伟. 花青素与姜黄素在食品包装领域的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(16): 5 137-5 143.
GAO Y, LI C Y, LI C W. Application of anthocyanins and curcumin in food packaging[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(16): 5 137-5 143.

[22] 周琳, 邹红竹, 韩璐璐, 等. 糖基转移酶在花瓣色泽形成中的作用研究进展[J]. 园艺学报, 2022, 49(3): 687-700.
ZHOU L, ZOU H Z, HAN L L, et al. Progress in the study of the role of glycosyl transferases in petal color formation[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(3): 687-700.

[23] 刘勇, 李立. pH值敏感型食品新鲜度指示标签及其应用的研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(11): 52-59.
LIU Y, LI L. Research progress on pH-sensitive food freshness indication labeling and its application[J]. Meat Research, 2022, 36(11): 52-59.

[24] 王芳. 基于花青素的猪肉新鲜度智能指示包装膜的制备与研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021: 8-12.
WANG F. Preparation and research of smart indication packaging film for pork freshness based on anthocyanin[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021: 8-12.

[25] 蒋光阳. 基于紫薯花青素智能指示膜的制备及新鲜度指示应用研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2022: 3-5.
JIANG G Y. Preparation of smart indicator film based on purple potato anthocyanins and application research on freshness indication[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022: 3-5.

[26] 汪金林, 赵进, 吕卫金, 等. 原花青素对冷藏养殖大黄鱼鱼片保鲜效果研究[J]. 中国食品学报, 2013, 13(2): 130-136.
WANG J L, ZHAO J, LU W J, et al. Study on the effect of proanthocyanidins on the freshness preservation of frozen cultured yellow croaker fillets[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(2): 130-136.

[27] 刘小林, 陈进, 顾颖慧. 不同浓度原花青素对青州蜜桃保鲜效果的影响[J]. 潍坊工程职业学院学报, 2019, 32(4): 98-101.
LIU X L, CHEN J, GU Y H. Effects of different concentrations of proanthocyanidins on the freshness preservation effect of Qingzhou peach[J]. Journal of Weifang Engineering Vocational College, 2019, 32(4): 98-101.

[28] 张在花, 常大勇, 孙明明, 等. 紫薯花青素的提取及在柑橘保鲜中的应用研究[J]. 中国果菜, 2023, 43(5): 11-16.
ZHANG Z H, CHANG D Y, SUN M M, et al. Extraction of anthocyanins from purple yam and their application in citrus preservation[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(5): 11-16.

[29] 李玲, 闫旭宇. 茄子皮花青素的提取及其防腐保鲜效果[J]. 热带农业科学, 2018, 38(11): 54-58, 62.
LI L, YAN X Y. Extraction of anthocyanins from eggplant peels and their antiseptic and freshness preservation effects[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(11): 54-58, 62.

[30] 张海霞, 包良. 紫色马铃薯花青素的抑菌性及其对草莓保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 293-298.
ZHANG H X, BAO L. Research on the antibacterial property of purple potato anthocyanins and its effect on strawberry preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 293-298.

[31] 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 L, LI Y X, JI X Y, et al. Preparation and characterization of anthocyanin-gelatin/poly (vinyl alcohol) -starch composite films[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(23): 109-115.

[32] 曾俊, 任小娜, 魏健, 等. 花青素pH响应型智能包装及其在食品新鲜度监测中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 333-338.
ZENG J, REN X N, WEI J, et al. pH-responsive smart packaging of anthocyanins and its application in food freshness monitoring[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(2): 333-338.

[33] 李新欣, 陈复生, 张强, 等. 蛋白质基可食用膜的研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 386-389.
LI X X, CHEN F S, ZHANG Q, et al. Advances in the research of protein-based edible films[J]. The Food Industry, 2021, 42(6): 386-389.

[34] LI N N, ZHOU Z G, WU F Q, et al. Development of pH-indicative and antimicrobial films based on polyvinyl alcohol/

starch incorporated with ethyl lauroylarginate and mulberry anthocyanin for active packaging[J]. Coatings, 2022, 12(10): 1 392.

[35] 张莉, 陈蕴智, 张正健. 壳聚糖接枝原花青素负载氧化石墨烯薄膜的制备及其包装性能研究[J]. 数字印刷, 2020(5): 82-89.
ZHANG L, CHEN Y Z, ZHANG Z J. Preparation of chitosan-grafted proanthocyanidin-loaded graphene oxide films and their packaging properties[J]. Digit Print, 2020(5): 82-89.

[36] LI L L, XIA L, XIAO F, et al. Colorimetric active carboxymethyl chitosan/oxidized sodium alginate-*Oxalis triangularis* ssp. *Papilionacea* anthocyanins film@gelatin/zein-linalool membrane for milk freshness monitoring and preservation[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134994.

[37] 赵芳芳. 晋黑糯玉米花青素的提取纯化及在冷鲜肉保鲜中的应用[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022: 1-10.
ZHAO F F. Extraction and purification of anthocyanins from Jin black glutinous corn and their application in cold meat preservation[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022: 1-10.

[38] 王纪鹏, 虢有婕, 韩毅, 等. pH 敏感性材料在智能食品包装中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 48-55.
WANG J P, GUO Y J, HAN Y, et al. Advances in the application of pH-sensitive materials in smart food packaging [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 48-55.

[39] 赵然. 植物精油复合花青素可食膜的制备及其保鲜效果研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2021: 1-3.
ZHAO R. Preparation of plant essential oil composite anthocyanin edible film and its freshness preservation effect [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021: 1-3.

[40] 余紫娟. 负载原花青素的纳米颗粒/壳聚糖膜的构建及其在鱼肉保鲜中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 1-6.
YU Z J. Construction of nanoparticle/chitosan membrane loaded with proanthocyanidins and its application in fish preservation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 1-6.

[41] YANG Z K, ZHAI X D, ZHANG C C, et al. Agar/TiO_2/radish anthocyanin/neem essential oil bionanocomposite bilayer films with improved bioactive capability and electrochemical writing property for banana preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107187.

[42] 赵文鹏, 赵昌玉, 单洪雁, 等. 花色苷在不同环境因素和食品基质中的降解规律[J]. 轻工学报, 2023, 38(2): 41-47.
ZHAO W P, ZHAO C Y, SHAN H Y, et al. Degradation patterns of anthocyanins in different environmental factors and food matrices[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(2): 41-47.

[43] 黎瑞珍, 吴丽, 刘美然, 等. 分光光度法测定火龙果中花青素的含量[J]. 海南热带海洋学院学报, 2023, 30(2): 115-121.
LI R Z, WU L, LIU M R, et al. Determination of anthocyanin content in dragon fruit by spectrophotometric method[J]. Journal of Hainan Tropical Ocean University, 2023, 30(2): 115-121.

[44] 衡洋洋, 周志磊, 陈超, 等. 黑果枸杞乳酸菌发酵饮料生产工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(15): 114-121.
HENG Y Y, ZHOU Z L, CHEN C, et al. Study on the production process of lactic acid bacteria fermented beverage with blackfruit and wolfberry[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(15): 114-121.

[45] 许乐贝, 张见, 刘元法. 真空冷冻干燥制备花青素微胶囊及稳定性研究[J]. 食品工业, 2023, 44(12): 36-40.
XU L B, ZHANG J, LIU Y F. Preparation of anthocyanin microcapsules by vacuum freeze-drying and stability study[J]. The Food Industry, 2023, 44(12): 36-40.

[46] 纪秀凤. 红树莓籽中低聚原花青素纯化鉴定及其微胶囊化研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2019: 1-5.
JI X F. Purification and identification of oligomeric proanthocyanidins from red raspberry seeds and their microencapsulation[D]. Jinzhou: Bohai University, 2019: 1-5.

[47] 王余梦, 陈伟, 蔡子维, 等. 紫薯中花青素微胶囊的制备[J]. 现代盐化工, 2019, 46(2): 21-24.
WANG Y W, CHEN W, CAI Z W, et al. Preparation of anthocyanin microcapsules from purple potato[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2019, 46(2): 21-24.

[48] 李丹, 汪秀妹, 梁杰, 等. 复合凝聚法制备槲皮素微胶囊及其表征[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(15): 127-135.
LI D, WANG X M, LIANG J, et al. Preparation of quercetin microcapsules by composite coalescence method and its characterization[J]. Food Research and Development, 2023, 44 (15): 127-135.

[49] 吴晓龄, 王建飞, 潘利华, 等. 蓝莓花青素微胶囊的制备工艺优化[J]. 农产品加工, 2020(16): 38-42.
WU X L, WANG J F, PAN L H, et al. Optimization of the preparation process of blueberry anthocyanin microcapsules [J]. Farm Products Processing, 2020(16): 38-42.

[50] 慕静怡, 胡发广, 张珍珍, 等. 不同壁材对绿咖啡油微胶囊微观结构及其热稳定性的影响[J]. 热带作物学报, 2023, 44(3): 647-660.
MU J Y, HU G F, ZHANG Z Z, et al. Effects of different wall materials on the microstructure of green coffee oil microcapsules and their thermal stability[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(3): 647-660.

[51] 李星宇, 刘港, 高逸飞, 等. 载花青素微胶囊的制备及其抗氧化性能[J]. 武汉工程大学学报, 2020, 42(2): 177-180.
LI X Y, LIU G, GAO Y F, et al. Preparation of anthocyanin-loaded microcapsules and their antioxidant properties[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2020, 42(2): 177-180.

[52] RASHID S A, TONG W Y, LEONG C R, et al. Anthocyanin microcapsule from clitoriaternatea: potential bio-preservative and blue colorant for baked food products[J]. Arabian Journal

for Science and Engineering, 2021, 46: 65-72.

[53] 宋佳琳. 原花青素微胶囊对鸡肉肠品质影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022: 1-3.
SONG J L. Study on the effect of proanthocyanidin microcapsules on the quality of chicken intestine[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022: 1-3.

[54] 方仕阳, 钟秋夏, 张一弛, 等. 乙基纤维素/蓝莓花青素浸泡型标签对牛奶新鲜度的指示[J]. 包装工程, 2023, 44(11): 27-37.
FANG S Y, ZHONG Q X, ZHANG Y C, et al. Indication of freshness of milk by ethyl cellulose/blueberry anthocyanin soaking label[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(11): 27-37.

[55] MORSY M K, MORSY O M, ABDELMONEM M A, et al. Anthocyanin-colored microencapsulation effects on survival rate of *Lactobacillus rhamnosus* GG, color stability, and sensory parameters in strawberry nectar model[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(2): 352-367.

[56] GUTIÉRREZ T J, ALVAREZ V A. Bionanocomposite films developed from corn starch and natural and modified nano-clays with or without added blueberry extract[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 407-420.

[57] 王学瑛, 王子迎, 汪甜莉, 等. 蓝莓花青素微胶囊的制备及在卷烟中的应用[J]. 合肥师范学院学报, 2021, 39(6): 30-34.
WANG X Y, WANG Z Y, WANG T L, et al. Preparation of blueberry anthocyanin microcapsules and their application in cigarettes[J]. Journal of Hefei Normal University, 2021, 39(6): 30-34.

[58] 宋若琳, 郭晓晖. 我国营养标签的新变化对食品消费市场的启示[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 11-17.
SONG R L, GUO X H. Implications of the new changes in China's nutrition labeling for the food consumption market[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 11-17.

[59] 李腾飞. 国外粮食减损治理模式及经验启示[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 208-216.
LI T F. Governance model and experience of foreign food loss reduction[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 208-216.

[60] 于江, 王嘉懿, 谢利, 等. 基于包装功能的时间—温度指示器与食品新鲜度指示器研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(19): 49-55.
YU J, WANG J Y, XIE L, et al. Research progress on time-temperature indicator and food freshness indicator based on packaging function[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(19): 49-55.

[61] 李秋莹, 于昕睿, 刘铮, 等. 姜黄素/茜素 pH 敏感蛋白纤维膜的制备及对金枪鱼鲜度的指示作用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 260-269.
LI Q Y, YU X R, LIU Z, et al. Preparation of curcumin/alizarin pH-sensitive protein fiber membranes and indication of tuna freshness[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 260-269.

[62] 薛佳祺, 王颖, 周辉, 等. 包装技术在肉制品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 367-373.
XUE J Q, WANG Y, ZHOU H, et al. Research progress of packaging technology in meat products preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 367-373.

[63] 贺红梅. 酚酸辅色花青素纤维膜用于水产品新鲜度可视化监测[D]. 长春: 吉林大学, 2023: 1-5.
HE H M. Phenolic acid cochromic anthocyanin fiber membrane for visual monitoring of aquatic products' freshness [D]. Changchun: Jilin University, 2023: 1-5.

[64] 郜海燕, 吴伟杰, 穆宏磊, 等. 食品新技术在生鲜农产品供应链绿色保鲜中的应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 1-12.
GAO H Y, WU W J, MU H L, et al. Application of new food technology in green preservation of fresh produce supply chain [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 1-12.

[65] ZHANG T T, WANG H L, QI D X, et al. Multifunctional colorimetric cellulose acetate membrane incorporated with *Perilla frutescens* (L.) Britt. anthocyanins and chamomile essential oil[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118914.

[66] HAO Y P, KANG J M, GUO X Q, et al. pH-responsive chitosan-based film containing oregano essential oil and black rice bran anthocyanin for preserving pork and monitoring freshness[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134393.

[67] YANG J, FAN Y L, CUI J Y, et al. Colorimetric films based on pectin/sodium alginate/xanthan gum incorporated with raspberry pomace extract for monitoring protein-rich food freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 959-965.

[68] EBRAHIMI V, NAFCHI A M, BOLANDI M, et al. Fabrication and characterization of a pH-sensitive indicator film by purple basil leaves extract to monitor the freshness of chicken fillets[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100946.

[69] 周希. 鸡肉天然复合保鲜膜与新鲜度指示标签的制备及应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021: 1-5.
ZHOU X. Preparation and application of natural composite freshness preservation film and freshness indication label for chicken[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021: 1-5.

[70] CAO G Y, BU N T, ZENG T T, et al. Development of pH-responsive konjac glucomannan/pullulan films incorporated with acai berry extract to monitor fish freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219: 897-906.

[71] WEN Y Y, LIU J, JIANG L, et al. Development of intelligent/active food packaging film based on TEMPO-oxidized bacterial cellulose containing thymol and anthocyanin-rich purple potato extract for shelf life extension of shrimp[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 29: 100709.

[72] TAVASSOLI M, KHEZERLOU A, MOGHADDAM T N, et al. Sumac (*Rhus coriaria* L.) anthocyanin loaded-pectin and chitosan nanofiber matrices for real-time monitoring of shrimp freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125044.

[73] HUANG J Y, LIU J L, CHEN M Y, et al. Immobilization of roselle anthocyanins into polyvinyl alcohol/hydroxypropyl methylcellulose film matrix: study on the interaction behavior and mechanism for better shrimp freshness monitoring[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 666-677.

[74] 刘黎. 基于蝶豆花花青素的东方对虾新鲜度指示膜研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 1-75.
LIU L. Research on the freshness indicator film of Oriental shrimps based on pterostilbene anthocyanins[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 1-75.

[75] 王欣, 李停停, 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.

[76] 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 rosehip anthocyanin and its application in pomfret packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 1-6.

[77] 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: 126674.

[78] KUSWANDI B, ASIH N P N, PRATOKO D K, et al. Edible pH sensor based on immobilized red cabbage anthocyanins into bacterial cellulose membrane for intelligent food packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2020, 33(8): 321-332.

[79] 岳崇泽, 王远哲, 王桂英. 蝶豆花青素智能指示标签的制备及其对牛奶新鲜度的监测[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(3): 37-44.
YUE C Z, WANG Z Y, WANG G Y. Preparation of smart indicator labels for butterfly bean anthocyanins and their monitoring of milk freshness[J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(3): 37-44.

[80] 蒋庆玥. 壳聚糖/花青素智能标签的制备及应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022: 21-36.
JIANG Q Y. Preparation and application of chitosan/anthocyanin smart labels[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2022: 21-36.

（上接第 208 页）

[64] RUKUNDO I R, DANAO M-G C, WELLER C L, et al. Use of a handheld near infrared spectrometer and partial least squares regression to quantify metanil yellow adulteration in turmeric powder[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2020, 28(2): 81-92.

[65] CANTARELLI M Á, MOLDES C A, MARCHEVSKY E J, et al. Low-cost analytic method for the identification of Cinnamon adulteration[J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105513.

[66] 王伟, 赵昕, 褚璇, 等. 基于可见/近红外高光谱的八角茴香与莽草无损鉴别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 373-379.
WANG W, ZHAO X, CHU X, et al. Nondestructive identification of star anise and shikimmi by visible/near infrared hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 373-379.

[67] LOHUMI S, LEE S, LEE W H, et al. Detection of starch adulteration in onion powder by FT-NIR and FT-IR spectroscopy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(38): 9 246-9 251.

[68] LI X W, LU R, WANG Z X, et al. Detection of corn and whole wheat adulteration in white pepper powder by near infrared spectroscopy[J]. American Journal of Food Science and Technology, 2018, 6(3): 114-117.

[69] GALVIN-KING P, HAUGHEY S A, ELLIOTT C T. Garlic adulteration detection using NIR and FTIR spectroscopy and chemometrics[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103757.

[70] 黎强, 周颖, 刘佳明, 等. 基于偏最小二乘法的近红外光谱测定八角中反式茴香脑和莽草酸[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(4): 38-46.
LI Q, ZHOU Y, LIU J M, et al. Determination of trans-anethole and shikimic acid content in star anise by near infrared spectroscopy based on partial least squares method[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2023, 43(4): 38-46.

[71] 吴习宇. 花椒产地、新陈度及掺伪的近红外光谱鉴别方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 79-86.
WU X Y. Identification of geographical origin, freshness and adulteration of Huajiao by near infrared spectroscopy[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 79-86.

[72] LIM J, MO C, KIM G, et al. Development of models for the prediction of domestic red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder capsaicinoid content using visible and near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2015, 40 (1): 47-60.

[73] JING B W, SONG W S, GAO X, et al. A feasibility quantification study of capsaicin content in chili powder for rapid evaluation using near-infrared reflectance spectroscopy [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 4 405-4 414.