

# 花青素与姜黄素在食品包装领域的应用

高媛, 李辰钰, 李春伟\*

(东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 花青素(anthocyanin, ATH)和姜黄素(curcumin, CR)是无毒无害的天然色素, 具有优异的 pH 敏感特性和抗氧化性能, 常常作为包装成分监测食品质量。花青素和姜黄素由于其自身结构特点, 在不同的 pH 下有不同颜色, 花青素变色范围广, 但性质不稳定, 易受到外界因素影响。姜黄素稳定性高于花青素, 但变色范围窄。两者均可作为颜色指示剂与抗氧化剂应用在食品包装中。花青素和姜黄素的变色特点、稳定性以及功能活性对食品新鲜度指示包装的性能具有显著的影响, 将两种色素混合作为指示剂添加到食品包装中, 有助于提高花青素的稳定性, 从而获得更好的指示效果。因此花青素和姜黄素对于活性包装至关重要, 探讨其内在机制, 可为花青素、姜黄素智能包装膜的相关研究提供理论参考。本文综述了花青素、姜黄素的结构和性质、抗氧化活性、花青素和姜黄素在食品包装上的应用, 以期为食品安全提供支持, 为食品包装行业发展提供参考。

**关键词:** 花青素; 姜黄素; 新鲜度指示; 食品包装

## Application of anthocyanin and curcumin in the field of food packaging

GAO Yuan, LI Chen-Yu, LI Chun-Wei\*

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**ABSTRACT:** Anthocyanin (ATH) and curcumin (CR) are non-toxic and harmless natural pigments with excellent pH-sensitive properties and antioxidant properties, which are often used as packaging ingredients to monitor food quality. Anthocyanin and curcumin have different colors at different pH due to their own structural characteristics. Anthocyanin has a wide discoloration range, but its properties are unstable and easily affected by external factors. Curcumin is more stable than anthocyanin, but has a narrower discoloration range. Both can be used as color indicators and antioxidants in food packaging. The discoloration characteristics, stability and functional activity of anthocyanin and curcumin have a crucial effect on the performance of food freshness indicator packaging. Mixing the 2 pigments as an indicator added to food packaging, which can help improve the stability of anthocyanin, so as to obtain a better indicator effect. Therefore, anthocyanin and curcumin are very significant for active packaging. Exploring their internal mechanism can provide a theoretical reference for the related research on anthocyanin and curcumin intelligent packaging films. This paper reviewed the structure and properties, antioxidant activity of anthocyanin and curcumin, the their application in food packaging, so as to provide support for food safety and provide reference for the development of food packaging industry.

**基金项目:** 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E001)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572018BL09)、东北林业大学大学生科研训练计划项目(KY202231)

**Fund:** Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2019E001), the Fundamental Research Funds for Central Universities (2572018BL09), and the Northeast Forestry University Student Scientific Research Training Program (KY202231)

\*通信作者: 李春伟, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能包装与功能薄膜。E-mail: lewnefu@126.com

\*Corresponding author: LI Chun-Wei, Ph.D, Associate Professor, Northeast Forestry University, No.26, Hexing Road, Xiangfang District, Harbin 150040, China. E-mail: lewnefu@126.com

**KEY WORDS:** anthocyanin; curcumin; freshness indicator; food packaging

## 0 引言

食品包装可以保护食品免受外界环境、物理、微生物等因素的干扰。目前,用来监测食品新鲜度的商业化指示标签有 OnVu™ 标签和 SensorQ™ 标签, OnVu™ 标签是用于冷藏食品的基于固态的光致变色反应的智能标签,当用紫外线照射(激活)时,墨水颜色从无色变为蓝色。一旦激活,墨水就会以取决于时间和温度的速率恢复到无色状态,在食品供应链中, OnVu™ 可以监测食品温度随时间的变化,从而得知食品中微生物的存活率及蛋白质变性情况<sup>[1]</sup>;而 SensorQ™ 基于产品中微生物代谢物的敏感性,根据微生物生长或化学变化提供产品质量信息,从而监测肉类和家禽等产品的腐败情况<sup>[2]</sup>。这种智能指示标签指示效果好,但相较于普通包装成本较高,且不具备活性包装的抗氧化性能及可以延长食品保质期的优点。

随着贮存时间的延长,食品在微生物的作用下易发生腐败,从而导致包装系统内 pH 发生变化,在包装中添加 pH 指示剂可以感知食品品质的变化情况,消费者无需打开包装就能得知关于食品质量的信息<sup>[3]</sup>。在智能包装中,现用于指示食品新鲜度的指示剂主要分为化学指示剂和天然指示剂。常用的化学指示剂有甲基红、甲基橙、溴甲酚紫和溴甲酚绿等<sup>[4]</sup>,这类指示剂稳定性好、颜色变化明显,但是显色范围小,且使用过程中化学物质迁移会对食品安全造成影响<sup>[3]</sup>。因此使用天然无毒的指示剂用来监测食品新鲜度十分重要,常用的天然指示剂主要有花青素和姜黄素。花青素(anthocyanin, ATH),又称花色素,是一种水溶性色素,属于类黄酮类物质,广泛的存在于自然界中,在黑米、玫瑰茄、桑葚、黑枸杞等食品基质中都有存在。姜黄素(curcumin, CR),是一种从姜科植物中提取的色素,是一种二酮类化合物,主要存在于天南星科、姜科的一些植物的根茎中。目前,越来越多的活性智能包装利用天然物质的抗氧化性及 pH 指示性来保障食品安全,而将花青素和姜黄素等天然物质添加到食品包装中成为包装研发的热点内容。本文对花青素和姜黄素的结构性质及抗氧化性能进行综述,重点介绍其在食品新鲜度指示包装上的应用进展,旨在为今后食品包装的研究和开发提供借鉴。

## 1 花青素和姜黄素的结构和性质

### 1.1 花青素的结构和性质

花青素的结构如图 1A 所示,其基本碳骨架结构为 C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>,由一个花色基元,即 2-苯肌苯并吡喃和取代基组成。自然界已知的花青素有 22 大类,500 多种,其中矢车菊素、天竺葵素、牵牛素、飞燕草素、翠雀素和芍药素

等花青素最为常见<sup>[5]</sup>。花青素一般以糖苷的形式存在,花青素可以与葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖等结合并形成糖苷键,另外,花色苷中含有糖苷基,在有机酸的作用下可形成酰基化的花色苷<sup>[6]</sup>。花青素结构特征不同,稳定性不同,通常甲基化程度高稳定性好,羟基化程度高稳定性差。另外,花青素还会受到 pH、光照、温度等因素影响。在不同的 pH 下,花青素可以改变其分子结构和颜色<sup>[7]</sup>。在 pH 1~3 时,花青素的颜色为鲜红色,主要存在形式是 2-苯肌苯并吡喃阳离子;在 pH 4~5 时,花青素的颜色为浅红色,主要存在形式是醇型假碱;在 pH 7~9 时,花青素的颜色为蓝紫色,主要形式是醌型碱; pH>9 时,花青素变为黄绿色,随着碱性的不断增强,花青素的颜色加深;在 pH 13 时变成蓝黑色<sup>[8]</sup>。由于花青素的颜色会随着 pH 的变化而发生改变,因此可以将其作为食品包装的新鲜度指示剂,用以监测食品的新鲜程度。

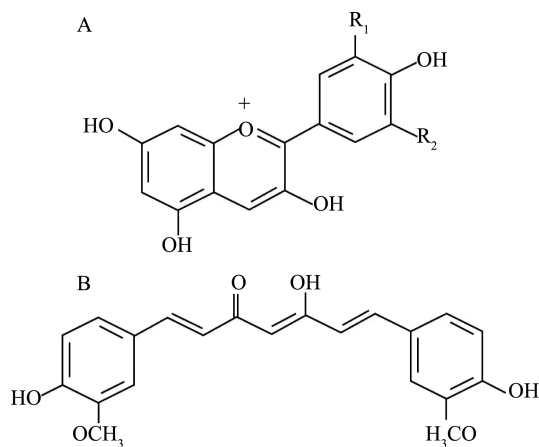


图 1 花青素(A)和姜黄素(B)的基本结构

Fig.1 Basic structures of anthocyanins (A) and curcumin (B)

### 1.2 姜黄素的结构和性质

姜黄素的结构如图 1B 所示,其化学式是 C<sub>21</sub>H<sub>20</sub>O<sub>6</sub>,具有特殊的二酮类结构,是一种橙黄色的结晶粉末,不溶于水,并有特殊的芳香气味<sup>[9]</sup>,可以溶于乙醇、丙二醇。在不同的 pH 下,姜黄素不同的结构对应着不同的颜色<sup>[10]</sup>。在碱性条件下,姜黄素两端的羟基会发生电子云偏离的共轭效应,因此姜黄素溶液遇碱会发生颜色变化,由橙黄变成红色;在酸性和碱性条件下,姜黄素分别呈现烯醇-酮式互变异构体<sup>[11]</sup>。在 pH 为 3~7 范围内,姜黄素溶液呈亮黄色;当 pH>8 时,溶液变成红色,随着 pH 的增加,溶液颜色变深,呈红棕色。根据姜黄素的 pH 响应特性,可以将其作为智能包装的 pH 指示剂,基于食品质量变化所产生的包装内部 pH 变化,姜黄素发生颜色响应,从而监测食品的质量情况。

## 2 花青素和姜黄素的抗氧化性

### 2.1 花青素的抗氧化及清除自由基活性

在花青素的各种生物活性中, 其抗氧化性对活性包装的开发十分重要。在食品包装的添加剂方面, 合成抗氧化剂成本低廉, 但有一定的安全风险<sup>[12]</sup>。然而花青素是一种非常强的抗氧化剂, 能够清除自由基, 且绿色安全、纯天然, 常常被选择作为食品包装的抗氧化剂<sup>[13]</sup>, 以此来延缓食品的氧化过程。尤其对于油脂的包装, 需要添加抗氧化剂来降低脂质氧化的速率, 或使用高阻隔的包装以减缓油脂的氧化和酸败过程, 从而延长其保质期, 但传统的石油基包装材料不仅难以降解, 还有石油基聚合物残留到食品中的风险。马越等<sup>[14]</sup>通过研究发现与单一的大豆蛋白膜相比, 含有花青素的蛋白膜有较强的抑制油脂氧化的能力, 可以有效延长油脂贮藏期, 同时保证了食品包装的安全性和可降解性。

研究表明, 抗氧化能力与酚类化合物的含量有关<sup>[15]</sup>。周婷婷<sup>[16]</sup>研究发现蓝莓花青素的清除自由基能力与花青素含量成正比, 且总抗氧化能力、总还原力的单位活性花青素均强于维生素 C。汤海清<sup>[17]</sup>对桑葚花青素的研究表明, 提纯后的花青素具有良好的脂质过氧化抑制效果和自由基去除效果, 其抗氧化能力随浓度的增加而不断增加。KIM 等<sup>[18]</sup>将不同量的黑莓花青素添加到海藻酸盐薄膜中, 发现复合膜的抗氧化能力随着黑莓花青素含量的增加而增加; WU 等<sup>[19]</sup>研究发现随着花青素浓度的增加, 复合膜的自由基清除率显著增强。因此, 花青素在包装膜中的含量对抗氧化包装十分重要。然而在包装膜的生产及运输过程中, 花青素暴露于外界环境时易发生降解, 会导致包装中的花青素含量减少。所以在实际应用时应严格控制含有花青素的活性包装的流通环境, 还可以将抗氧化包装与抗紫外线包装相结合, 尽可能减少外界环境对花青素活性的影响。

### 2.2 姜黄素的抗氧化活性

姜黄素分子中存在甲氧基、苯环上的酚羟基、2 个如同肉桂醛的苯丙稀酰基骨架等功能基因, 使其具有很强的抗氧化活性<sup>[20]</sup>。姜黄素能作为自由基清除剂, 中和环境中多余的自由基, 起到抗氧化的作用。一些研究人员将不同浓度的姜黄素添加到包装中, 探究抗氧化活性与姜黄素含量的关系。吕妍霄等<sup>[21]</sup>以新鲜鸡皮提取的明胶为成膜基材, 添加姜黄素, 制备一种鸡皮明胶复合膜, 结果表明随着姜黄素浓度的增加, 鸡皮明胶膜的抗氧化性和抑菌性显著增强。RACHTANAPUN 等<sup>[22]</sup>制备了姜黄素/壳聚糖复合膜, 结果显示姜黄素含量最高的复合膜显示出最高的抗氧化能力。ROY 等<sup>[23]</sup>研究发现姜黄素的加入使复合膜的自由基清除率显著增加, 复合膜抗氧化性能与姜黄素的含量成正比。此外, 在 ROY 等<sup>[24]</sup>研究发现复合膜的抗氧化活性取决于姜黄素的含量。因此, 选择姜黄素作为活性包装的抗氧化剂时, 可以根据

被包装食品的理化性质添加适宜浓度的姜黄素, 从而保护氧化敏感食品, 保持食品质量并延长食品保质期。

另外, 姜黄素还可以作为细胞抗氧化能力的诱导剂, 可以增强抗氧化酶活和二项代谢酶的活性, 从而提高细胞的抗氧化能力<sup>[25]</sup>。曾瑜等<sup>[26]</sup>研究发现姜黄素能增强小鼠体内的抗氧化能力, 对小鼠急性酒精性肝损伤具有一定的保护作用。刘梦杰<sup>[27]</sup>发现姜黄素的添加能够改善热应激蛋鸡的脂质代谢, 并增强血清、肝脏和肠道抗氧化能力。作为天然的活性化合物, 姜黄素以其良好的抗氧化性、抗菌、抗炎等特性, 将会在包装功能薄膜方面有广阔的发展前景。

## 3 花青素和姜黄素在食品新鲜度指示包装领域的应用

### 3.1 花青素在食品新鲜度指示包装上的应用

近年来, 基于生物聚合物和花青素的活性智能包装的开发越来越受到关注<sup>[28]</sup>, 富含花青素的生物聚合物薄膜具有多种功能性, 如抗菌、抗氧化、可降解、指示等, 这些功能可在保障食品质量安全的同时延长食品的保质期, 并减少包装材料对环境的影响。一些研究人员将不同种类的花青素作为新鲜度指示剂应用在食品包装中, 以此制造指示膜或指示标签。郭娜等<sup>[29]</sup>制备的结冷胶/沙蒿胶-蓝莓花青素膜对 pH 有明显的指示作用, 在实际应用中, 复合膜可根据包装系统内的 pH 变化发生颜色响应, 从而指示食品的新鲜度。孙武亮等<sup>[30]</sup>制备了花青素纳米纤维智能标签用于检测羊肉的新鲜度, 准确率达到 88.2%, 且成本低廉, 是肉类实现无损化检测的新选择。牛奶等乳制品在流通和销售过程中非常容易受到微生物的影响, 因此设计一套实时监测乳制品新鲜程度的包装系统十分必要。GOODARZI 等<sup>[31]</sup>将黑胡萝卜花青素固定在淀粉基质中, 以此来监测牛奶的新鲜度, 标签由最初的深蓝色逐渐变成紫色, 由指示标签的颜色变化便可以区分牛奶的变质情况。肉类含有蛋白质等多种营养元素, 在微生物的作用下易腐败变质。挥发性盐基氮是检测肉类新鲜程度的主要指标<sup>[32]</sup>, 即在蛋白质变质过程中, 产生的碱性含氮化合物, 会导致包装内的 pH 变大, 因此 pH 的变化情况可以反映食品质量<sup>[33]</sup>。如表 1 所示, 不同来源的花青素、不同的成膜基质相互组合, 以此来监测肉类的新鲜度。花青素的加入不仅使复合膜具有指示功能, 还提高了复合膜的抗氧化、紫外光阻隔等性能。结果表明, 花青素指示膜在肉类的变质过程中有明显的变色, 可以根据指示膜颜色变化判断肉类质量。但是来自不同提取物花青素的稳定性、对 pH 的敏感度、不同含量花青素的指示效果是不同的, 关于最适合作为食品包装的新鲜度指示剂的花青素来源仍需进一步研究。另外指示膜的颜色变化往往会受到外界因素的影响产生误差, 肉眼观察到的颜色变化也同样存在差异, 因此未

来应加大对指示剂稳定性的研究,并在不过大增加包装成本的情况下将电子信息技术与包装系统相结合,从而给消费者提供更精准的食品信息。

### 3.2 姜黄素在食品新鲜度指示包装上的应用

姜黄素的抗氧化性、抗菌性及在碱性条件下变色的特点使其在食品包装中很受欢迎。其优异的生物活性使得姜黄素可以作为功能性物质添加到食品包装中。基于姜黄素的智能包装系统或生物聚合物可作为监测动物性蛋白质食品新

鲜度的有效指标<sup>[39]</sup>。大多数蛋白质食品的变质与微生物有关,变质过程中产生挥发性盐基氮,从而改变包装系统内的 pH。而含有姜黄素的薄膜可以灵敏的检测酸碱反应,一旦包装内部的 pH 发生变化,包装膜便会发生相应的颜色变化<sup>[40]</sup>。因此针对蛋白质类食品,可利用含有姜黄素的智能包装膜对其进行包装,从而反馈食品新鲜程度。如表 2 所示,姜黄素在与卡拉胶、明胶、聚乙烯醇等物质混合时,可以发生颜色响应以监测食品在贮藏期间的腐败情况。

表 1 花青素指示膜指示肉类新鲜程度的案例  
Table 1 Cases of anthocyanin indicating films indicating the freshness of meat

花青素来源	成膜基质	食品种类	效果
杨梅提取物	木薯淀粉	猪肉	与淀粉膜相比,淀粉-杨梅提取物膜有更高的抗氧化性、拉伸强度和紫外光阻隔性能,当其暴露在氯化氢和氨气中时有明显的颜色变化,可用于监测猪肉的新鲜度 <sup>[34]</sup>
黑豆、黑米、黑枸杞、桑葚	壳聚糖、淀粉	猪肉	花青素的加入明显提高了复合膜的抗氧化性能,4 种花青素指示膜均可指示猪肉的新鲜度,花青素的显色效果与花青素的来源有关,实验表明黑枸杞花青素的显色效果最佳 <sup>[35]</sup>
牵牛花、玫瑰、桑葚、葡萄皮、紫山药等	结冷胶、壳聚糖、聚乙烯醇、普鲁兰多糖、海藻酸钠	三文鱼	综合比较优选出普鲁兰多糖海藻酸钠双层膜,指示膜的变色情况与花青素的含量和种类有关,当添加基质质量 8% 的桑葚花青素时,指示膜对胺类物质的响应最敏感,将其用于三文鱼的新鲜度指示,指示膜发生明显颜色变化。另外,双层膜可以改善花青素的不稳定性 <sup>[36]</sup>
紫薯	马铃薯淀粉、羧甲基纤维素钠	草鱼	草鱼的质量与挥发性盐基氮、pH 及菌落总数有关,当这 3 个指标达到一定数值时,指示膜便会发生变色,因此指示膜可以用来监测鱼肉新鲜度 <sup>[37]</sup>
山楂提取物	明胶、壳聚糖、纳米纤维素	虾	用山楂提取物制备的明胶/壳聚糖/纳米纤维素复合膜在应用过程中有明显的颜色变化,并与虾的变质程度相对应,可以根据薄膜的变色情况实时提供虾的新鲜程度信息 <sup>[38]</sup>

表 2 姜黄素作为指示剂和抗菌剂的应用效果  
Table 2 Application effects of curcumin as indicator and antibacterial agent

姜黄素用途	成膜基质	效果
指示	卡拉胶	低含量的姜黄素可以很好地分散在膜基质中,明显改善了膜的阻隔性能和拉伸强度,复合膜在碱性条件下表现出了强烈的颜色变红,实验表明复合膜可以用于监测猪肉和虾在贮藏期间的腐败情况 <sup>[11]</sup>
指示	明胶	所制备的可食膜显示出了抗氧化性能,在与不同 pH 的介质接触后都可以使其颜色发生变化,结果表明姜黄素明胶膜可以提供有关食品腐败的信息 <sup>[41]</sup>
指示	玉米淀粉、聚乙烯醇	将指示膜用于鱼肉的新鲜度检测,随着时间变化薄膜颜色由黄变红,因此指示膜可以指示食品的质量变化 <sup>[42]</sup>
指示	低密度聚乙烯	复合膜对氨气敏感,随着贮藏时间延长,肉样品中挥发性盐基氮含量不断增加,复合膜颜色由浅黄色向浅棕色变化,该复合膜在食品包装中具有很好的发展潜力 <sup>[43]</sup>
抗菌	纤维素	复合膜具有很好的热稳定性和机械性能,用其检测大肠杆菌,表现出明显的抗菌活性,姜黄素含量与抑菌圈直径成正比,因此复合膜可以应用在食品包装和医疗领域 <sup>[44]</sup>
抗氧化	塔拉胶、聚乙烯醇	添加姜黄素的薄膜具有很大的抗氧化活性,可将其用于高脂肪食品的抗氧化包装,以延长保质期 <sup>[45]</sup>
抗氧化、抗菌	聚乳酸	姜黄素的加入提高了膜的机械性能,复合膜还表现出优异的紫外线阻隔性能、抗氧化性能和一定的抗菌活性,可将其用于活性食品包装 <sup>[46]</sup>

另外, 包装的抗菌性可以延缓食品变质, 起到延长食品保质期的作用。而姜黄素可以抑制食品中大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等微生物的生长, 因此可以在食品包装中添加姜黄素从而起到抗菌的作用。同时, 姜黄素具有很强的抗氧化性能, 可以用于延长高脂肪食品的保质期。姜黄素所展示出的紫外线阻隔性将会使其在食品包装中有很大的发展和应用前景。但是姜黄素不溶于水的特性降低了其在包装膜中的利用度, 可以利用固体分散技术或者配制姜黄素乳液从而提高其生物利用度。作为天然指示剂, 姜黄素的变色范围小, 其颜色稳定性会受到外界因素的干扰, 因此应进一步研究姜黄素的活性、颜色稳定性及在包装膜中的溶解性, 这对姜黄素的商业化发展十分重要。

### 3.3 混合色素在食品新鲜度指示包装上的应用

花青素和姜黄素作为天然色素应用在食品包装上有很多优势, 但也存在一定的局限性, 花青素性质不稳定, 易受到温度、光、pH 等因素的影响。ZHAI 等<sup>[47]</sup>的研究发现, 基于洛神花青素的复合膜在冷藏(4°C)条件下比在室温条件下(25°C)具有更好的稳定性。而在太阳光或室内灯光的照射下, 花青素的光化学降解会增加<sup>[48]</sup>。而姜黄素的变色范围小, 用作新鲜度指示剂无法监测食品整个货架期。另外, 姜黄素作为指示剂时的添加量比较敏感, 过量的添加会使姜黄素发生团聚从而降低膜的热稳定性, 而适宜的指示剂浓度才能对 pH 的变化有更清晰的颜色响应。姜黄素的稳定性高于花青素, 掺入姜黄素和花青素混合物的指示膜稳定性更好, 有更好的指示效果<sup>[49]</sup>。研究表明, 花青素和姜黄素的混合比单独的花青素或姜黄素对指示肉类新鲜度具有更高的敏感性<sup>[50]</sup>。

目前, 国内外许多研究将花青素、姜黄素及其他色素混合应用到食品包装上, 得到的薄膜性质往往比单一色素更好。CHEN 等<sup>[51]</sup>制备了含有姜黄素和花青素的视觉 pH 传感薄膜作为包装指示标签, 以淀粉、聚乙烯醇和甘油为成膜基质, 用于实时无损检测鱼的新鲜度, 颜色稳定测试表明, 在室温下 180 d, 掺入单一姜黄素的复合膜最稳定, 掺入单一花青素的复合膜最不稳定, 以 2:8 (V:V) 比例掺入姜黄素和花青素的淀粉/聚乙烯醇/甘油复合膜(starch/polyvinyl alcohol/glycerin, SPVAG)与鱼的新鲜度的相关性最好, SPVAG/ATH/CR 薄膜所呈现的 3 种不同的颜色, 分别对应鱼的新鲜、次新鲜及腐败的 3 个阶段, 能实时监测鱼的腐败情况。ZHOU 等<sup>[50]</sup>制备了双层指示膜, 分别以卡拉胶-姜黄素、卡拉胶-花青素、卡拉胶-姜黄素-花青素为指示层, 以魔芋葡甘露聚糖和山茶油为乳化层, 用来监测鸡肉的新鲜度, 结果表明含有单一花青素的指示膜和含有花青素姜黄素混合色素的指示膜比含有单一姜黄素的指示膜表现出更明显的颜色变化。在智能指示标签中, 将花青素与天然或合成色素混合使用, 可以提高花青素的稳定性<sup>[52]</sup>。郑辉等<sup>[53]</sup>制备了红甘蓝花青素和姜黄素混合色素的智能指示

标签, 用来指示猪肉的新鲜度, 结果显示, 在不同温度条件下, 红甘蓝花青素/姜黄素智能指示标签都具有随挥发性盐基氮值变化而变色的能力, 具有应用于猪肉新鲜度检测的潜力。DUAN 等<sup>[54]</sup>利用静电纺丝技术制备了一种含 CR 和 ATH 的支链淀粉/甲壳素纳米纤维(pullulan/chitin nanofibers, PCN)的静电纺纳米纤维, 将其用于活性食品包装, 并比较了不含色素、含单一色素和双色素的纳米纤维的物理化学性能, 结果显示含有 CR 和 ATH 的纳米纤维比含有 CR 或 ATH 的纳米纤维具有更强的抗氧化活性和抗菌活性, 在对 pH 的敏感性方面, PCN/CR 颜色变化不明显, PCN/ATH 在不同的 pH 下有不同的颜色变化, 但 PCN/CR/ATH 纳米纤维的颜色变化效果最显著, 表明电纺 PCN/CR/ATH 纳米纤维在智能食品包装领域将有很大的发展潜力。

花青素与姜黄素混合作为指示剂仍然有许多尚未解决的问题, 如两种色素的最佳混合比例仍未可知, 因此应进一步研究不同比例混合色素的功能活性。另外, 不同混合比例所得到的指示剂颜色变化并不相同, 在实际应用中可以设计比色卡或智能小程序, 使消费者清晰地了解包装膜颜色所对应的食品新鲜程度。

## 4 结束语

花青素、姜黄素具有抗氧化性、天然无污染等特点, 相比化学合成色素作为新鲜度指示剂应用在食品包装方面具有更大的优势, 可以更好地保障食品安全。但是天然色素的局限性使新鲜度指示包装仍需要克服许多难题, 如提取的色素在加工和储存过程中易降解, 导致生物利用度差, 稳定性降低; 指示剂容易受到外界环境干扰影响指示的准确性及指示剂响应不够迅速等, 针对以上问题, 可以将花青素与姜黄素混合以获得更好的指示效果; 也可以将有益的生物活性成分引入包装系统从而保证食品质量并提高食品安全性; 还可以将微胶囊技术与新鲜度指示包装有机结合, 从而使消费者获得更多的食品信息。天然指示剂未来发展应该评估其在包装中的稳定性, 进行颜色变化分析, 将电子信息技术应用在食品包装中, 研究食品的理化性质和感官特性, 全方位的评估食品质量, 以期进一步提高包装膜的指示准确性, 制备绿色、安全、高效的食品新鲜度指示膜。

## 参考文献

- [1] BRIZIO APDR, PRENTICE C. Use of smart photochromic indicator for dynamic monitoring of the shelf life of chilled chicken based products [J]. Meat Sci, 2014, 96(3): 1219-1226.
- [2] GHAANI M, COZZOLINO CA, CASTELLI G, et al. An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector [J]. Trends Food Sci Technol, 2016, 51: 1-11.
- [3] OLIVEIRA JG, BRAGA ARC, OLIVEIRA BR, et al. The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review [J]. Food Res Int, 2021. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.

- 110202
- [4] RUKCHON C, NOPWINYUWONG A, TREVANICH S, *et al.* Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast [J]. *Talanta*, 2014, 130: 547–554.
- [5] 徐青, 王代波, 刘国华, 等. 花青素稳定性影响因素及改善方法研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 218–24.
- XU Q, WANG DB, LIU GH, *et al.* Influencing factors and improving methods of anthocyanin stability [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(7): 218–224.
- [6] 林纪伟. 黑豆皮中多酚类成分分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2011.
- LIN JW. Polyphenols in the seed coat of black soybean [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2011.
- [7] QIN Y, YUN DW, XU FF, *et al.* Smart packaging films based on starch/polyvinyl alcohol and *Lycium ruthenicum* anthocyanins-loaded nano-complexes: Functionality, stability and application [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.106850
- [8] 胡金奎. 桑葚花色苷的分离制备、结构分析及其体外活性[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- HU JK. Separation and preparatio, structural analysis and in vitro activity of anthocyanins from mulberry fruits [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [9] 代德财, 闫浩, 徐雪峰. 姜黄素的提取工艺及其生物活性的研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(8): 159–161.
- DAI DC, YAN H, XU XF. Study on extraction progress and biological activity of curcumin [J]. *Chin Cond*, 2020, 45(8): 159–161.
- [10] MA QY, DU L, WANG LJ. Tara gum/polyvinyl alcohol-based colorimetric NH<sub>3</sub> indicator films incorporating curcumin for intelligent packaging [J]. *Sens Actuator B-Chem*, 2017, 244: 759–766.
- [11] 刘景荣. pH 颜色响应智能食品包装膜的制备、性能与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- LIU JR. Research on the preparation, properties and application of pH-sensing smart food packaging films [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [12] HREBIEN-FILISINSKA A. Application of natural antioxidants in the oxidative stabilization of fish oils: A mini-review [J]. *J Food Process Pres*, 2021. DOI: 10.1111/jfpp.15342
- [13] YONG HM, WANG XC, ZHANG X, *et al.* Effects of anthocyanin-rich purple and black eggplant extracts on the physical, antioxidant and pH-sensitive properties of chitosan film [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 94: 93–104.
- [14] 马越, 张超, 赵晓燕, 等. 含花青素大豆蛋白可食膜对油脂贮藏的影响[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(3): 22–25.
- MA Y, ZHANG C, ZHAO XY, *et al.* Effect of soybean protein edible film containing anthocyanin on oil storage [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2010, 25(3): 22–25.
- [15] NOGUEIRA GF, FAKHOURI FM, VELASCO JI, *et al.* Active edible films based on arrowroot starch with microparticles of blackberry pulp obtained by freeze-drying for food packaging [J]. *Polymers-Basel*, 2019. DOI: 10.3390/polym11091382
- [16] 周婷婷. 蓝莓花青素分析及抗氧化活性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- ZHOU TT. Blueberry anthocyanin assay and its antioxidant detection [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [17] 汤海清. 桑葚中花青素的抗氧化活性及与牛血红蛋白间相互作用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- TANG HQ. Study on the antioxidant activity of anthocyanin in mulberry and its interaction with bovine hemoglobin [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.
- [18] KIM S, BAEK SK, SONG KB. Physical and antioxidant properties of alginate films prepared from sargassum fulvellum with black chokeberry extract [J]. *Food Packag Shelf*, 2018, 18: 157–163.
- [19] WU CH, LI YL, SUN JS, *et al.* Novel konjac glucomannan films with oxidized chitin nanocrystals immobilized red cabbage anthocyanins for intelligent food packaging [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105245
- [20] 彭翔. 抗菌肽和姜黄素对肉仔鸡生长性能、抗氧化功能、肠道微生物及免疫功能的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- PENG X. Effects of cecropin antimicrobial peptide and curcumin on growth performance, intestinal microflora and immune function of broilers [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [21] 吕妍霄, 薛伟. 姜黄素对鸡皮明胶膜的性能及结构的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(1): 83–90.
- LV YX, XUE W. Effects of curcumin on properties and structure of chicken skin gelatin film [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(1): 83–90.
- [22] RACHTANAPUN P, KLUNKLIN W, JANTRAWUT P, *et al.* Characterization of chitosan film incorporated with curcumin extract [J]. *Polymers-Basel*, 2021. DOI: 10.3390/polym13060963
- [23] ROY S, RHIM JW. Carboxymethyl cellulose-based antioxidant and antimicrobial active packaging film incorporated with curcumin and zinc oxide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 148: 666–676.
- [24] ROY S, RHIM JW. Curcumin incorporated poly(butylene adipate-co-terephthalate) film with improved water vapor barrier and antioxidant properties [J]. *Materials*, 2020. DOI: 10.3390/ma13194369
- [25] 王恬, 张婧菲. 姜黄素的理化特性、抗氧化功能及其在肉鸡生产中的应用[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(10): 3101–3107.
- WANG T, ZHANG JF. Physicochemical properties, antioxidant mechanism and application of curcumin in broiler production [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2014, 26(10): 3101–3107.
- [26] 曾瑜, 刘婧, 黄真真, 等. 姜黄素对急性酒精性肝损伤小鼠抗氧化功能的影响[J]. *卫生研究*, 2014, 43(2): 282–285.
- ZENG Y, LIU J, HUANG ZZ, *et al.* Effect of curcumin on antioxidant function in the mice with acute alcoholic liver injury [J]. *J Hyg Res*, 2014, 43(2): 282–285.
- [27] 刘梦杰. 姜黄素对热应激蛋鸡生产性能、血清生化指标和抗氧化及免疫功能的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- LIU MJ. Effect of curcumin on production performance, serum biochemical parameters, antioxidant and immune function of heat-stressed laying hens [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [28] YONG HM, LIU J. Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films [J]. *Food Packag Shelf*, 2020. DOI: 10.1016/j.fpsl.2020.100550
- [29] 郭娜, 朱桂兰, 张方艳, 等. 结冷胶-沙蒿胶-蓝莓花青素可食性膜的制备及其性能分析[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(1): 172–176.
- GUO N, ZHU GL, ZHANG FY, *et al.* Preparation and characteristics analysis of gellan gum-*Artemisia sphaerocephala* Krasch gum-blueberry anthocyanin edible film [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(1): 172–176.
- [30] 孙武亮, 李文博, 靳志敏, 等. 花青素纳米纤维智能标签对羊肉新鲜度的无损检测[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 24–30.
- SUN WL, LI WB, JIN ZM, *et al.* Non-destructive detection of mutton freshness using anthocyanin nanofiber smart Label [J]. *Trans Chin Soc*

- Agric Eng, 2021, 37(4): 24–30.
- [31] GOODARZI MM, MORADI M, TAJIK H, *et al.* Development of an easy-to-use colorimetric pH label with starch and carrot anthocyanins for milk shelf life assessment [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 153: 240–247.
- [32] 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 XB, XUE J, HUANG XW, *et al.* Development and application of an intelligent biolayer packaging film as a freshness indicator for salmon [J]. *Food Sci*, 2019, 40(23): 206–212.
- [33] RODE TM, HOVDA MB. High pressure processing extend the shelf life of fresh salmon, cod and mackerel [J]. *Food Control*, 2016, 70: 242–248.
- [34] YUN DW, CAI HH, LIU YP, *et al.* Development of active and intelligent films based on cassava starch and Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) anthocyanins [J]. *RSC Adv*, 2019, 9(53): 30905–30916.
- [35] 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, 2020.
- WANG F. Preparation and exploration of intelligent indication packaging film for anthocyanin-based pork freshness [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2020.
- [36] 薛瑾. 基于花青素的三文鱼新鲜度指示型包装材料研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- XUE J. Research on freshness indicator packaging material of salmon based on anthocyanin [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [37] 蒋光阳, 侯晓艳, 文任, 等. 淀粉-羧甲基纤维素钠-花青素指示膜的制备及在鱼肉新鲜度指示中的应用[J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 250–258.
- JIANG GY, HOU XY, WEN R, *et al.* Preparation of indicator films based on sodium carboxymethyl cellulose/starch and purple sweet potato anthocyanins for monitoring fish freshness [J]. *Food Sci*, 2020, 41(12): 250–258.
- [38] YAN JT, CUI R, TANG ZY, *et al.* Development of pH-sensitive films based on gelatin/chitosan/nanocellulose and anthocyanins from hawthorn (*Crataegus scabrifolia*) fruit [J]. *J Food Meas Charact*, 2021, 15(5): 3901–3911.
- [39] ALIABBASI N, FATHI M, EMAM-DJOMEH Z. Curcumin: A promising bioactive agent for application in food packaging systems [J]. *J Environ Chem Eng*, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105520
- [40] 周阿容, 林以琳, 邱建清, 等. 姜黄素膜运载体系的构建及功能性应用研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(7): 266–274.
- ZHOU AR, LIN YL, QIU JQ, *et al.* Recent progress in the construction and functional application of curcumin membrane delivery systems [J]. *Food Sci*, 2020, 41(7): 266–274.
- [41] MUSSO YS, SALGADO PR, MAURI AN. Smart edible films based on gelatin and curcumin [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 66: 8–15.
- [42] LIU D, DANG S, ZHANG L, *et al.* Corn starch/polyvinyl alcohol based films incorporated with curcumin-loaded Pickering emulsion for application in intelligent packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 188: 974–982.
- [43] ZHAI XD, WANG XY, ZHANG JJ, *et al.* Extruded low density polyethylene-curcumin film: A hydrophobic ammonia sensor for intelligent food packaging [J]. *Food Packag Shelf*, 2020. DOI: 10.1016/j.fpsl.2020.100595
- [44] LUON, VARAPRASAD K, REDDY GVS, *et al.* Preparation and characterization of cellulose/curcumin composite films [J]. *RSC Adv*, 2012, 2(22): 8483–8488.
- [45] MA QY, REN YM, WANG LJ. Investigation of antioxidant activity and release kinetics of curcumin from tara gum/polyvinyl alcohol active film [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 70: 286–292.
- [46] ROY S, RHIM JW. Antioxidant and antimicrobial poly(vinyl alcohol)-based films incorporated with grapefruit seed extract and curcumin [J]. *J Environ Chem Eng*, 2021. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104694
- [47] ZHAI XD, SHI JY, ZOU XB, *et al.* Novel colorimetric films based on starch/polyvinyl alcohol incorporated with Roselle anthocyanins for fish freshness monitoring [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 69: 308–317.
- [48] GHAREAGHAJLOU N, HALLAJ-NEZHADI S, GHASEMPOUR Z. Red cabbage anthocyanins: Stability, extraction, biological activities and applications in food systems [J]. *Food Chem*, 2021. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130482
- [49] ZHENG LM, LIU LM, YU JH, *et al.* Novel trends and applications of natural pH-responsive indicator film in food packaging for improved quality monitoring [J]. *Food Control*, 2022. DOI: 10.1016/j.foodcont.2021.108769
- [50] ZHOU X, YU XZ, XIE F, *et al.* pH-responsive double-layer indicator films based on konjac glucomannan/camellia oil and carrageenan/ anthocyanin/ curcumin for monitoring meat freshness [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.106695
- [51] CHEN HZ, ZHANG M, BHANDARI B, *et al.* Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105438
- [52] TAHERKHANI E, MORADI M, TAJIK H, *et al.* Preparation of on-package halochromic freshness/spoilage nanocellulose label for the visual shelf life estimation of meat [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 164: 2632–2640.
- [53] 郑辉, 蒋昊天, 王荔萱, 等. 花青素/姜黄素智能标签的制备及应用[J]. *包装工程*, 2020, 41(19): 17–21.
- ZHENG H, JIANG HT, WANG LX, *et al.* Development and application of an intelligent label based on anthocyanin/curcumin [J]. *Packag Eng*, 2020, 41(19): 17–21.
- [54] DUAN MX, YU S, SUN JS, *et al.* Development and characterization of electrospun nanofibers based on pullulan/chitin nanofibers containing curcumin and anthocyanins for active-intelligent food packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 187: 332–340.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介

高媛, 硕士研究生, 主要研究方向为智能包装。

E-mail: 2503685635@qq.com

李春伟, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能包装与功能薄膜。

E-mail: lcwnefu@126.com