臧亚楠, 王德宝, 罗灿灿, 等. 生物活性物质在食品智能指示膜中的应用与挑战 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 515−524. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070057

ZANG Yanan, WANG Debao, LUO Cancan, et al. Application and Challenges of Bioactive Ingredients in Food Intelligent Indication Films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 515−524. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070057

· 专题综述 ·

生物活性物质在食品智能指示膜中的应用与挑战

臧亚楠[1,2], 王德宝[2], 罗灿灿[1], 罗　辑[1,*]

（1.安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241001;
2.中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193）

摘　要: 随着经济发展和社会进步，消费者越来越注重食品安全品质，传统包装技术难以实时监测食品品质，因此，以新鲜度指示膜为代表的智能包装技术应运而生。生物活性物质因具备可降解、抗氧化及生物安全性的特性，成为构建绿色智能指示膜的核心材料。本文系统综述了生物活性物质在食品智能指示膜中的应用与挑战，发现纳米纤维素具有高负载与响应特性，兼具保护负载物质活性和良好的脂溶性物质负载特性；化学修饰可赋予纤维素衍生物基材优质的水溶性或有机物溶解性，使其易于成膜；多糖类材料不仅可提供结构支撑和负载平台也能通过响应环境刺激实现智能响应；蛋白质类可降解材料可制备亲水或疏水特性指示膜，应用在不同食品中。天然指示剂中黄酮、酚、醌类色素可通过与其他材料复配，在不同 pH 环境下通过颜色变化实现保鲜-监测功效。利用肉类、海鲜、果蔬及乳制品不同腐败变质信号与指示膜间的显色反应，可实现对它们新鲜度的实时监测。未来需进一步开发高性能载体及更稳定的指示剂，以推动智能指示膜向更多应用场景延伸，进而实现更纯净、高效、稳定的绿色包装应用。

关键词: 生物活性物质, 食品智能指示膜, 载体基质, 指示剂, 响应机制
中图分类号: TS206.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0515−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070057　　本文网刊:

Application and Challenges of Bioactive Ingredients in Food Intelligent Indication Films

ZANG Yanan[1,2], WANG Debao[2], LUO Cancan[1], LUO Ji[1,*]

（1.College of Life Science, Anhui Normal University, Wuhu 241001, China;
2.Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China）

Abstract: With economic development and social progress, consumers are paying more and more attention to food safety and quality. Traditional packaging techniques are difficult to monitor food quality in real time. Therefore, intelligent packaging technologies represented by freshness indicator films have emerged. Bioactive compounds, due to their degradability, antioxidant properties and biosafety, have become the core materials for constructing green and intelligent indicator films. This article systematically reviews the application and challenges of bioactive substances in food intelligent indicator films. It is found that nanocellulose has high loading and response characteristics, along with the dual advantages of preserving the bioactivity of encapsulated substances and providing favorable loading performance for lipophilic compounds. Chemical modification can endow cellulose derivative substrates with excellent water or organic solubility, making them easy to form films. Polysaccharide materials can not only provide structural support and load platforms, but also achieve intelligent

收稿日期: 2025−07−08
基金项目: 重要生物资源保护与利用研究安徽省重点实验室开放基金（swzy202012）; 国家自然科学基金（32302185）; 安徽省高校自然科学研究项目（2022AH052970）; 安徽师范大学博士科研启动基金（752014）。
作者简介: 臧亚楠（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工与品质控制, E-mail: 16831921@qq.com。
*** 通信作者:** 罗辑（1987−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 畜产品加工与品质控制, E-mail: luoji2019336@ahnu.edu.cn。

responses by responding to environmental stimuli. Protein-based degradable materials can be used to prepare hydrophilic or hydrophobic property indicator films and applied in various foods. Flavonoids, phenols and quinone pigments in natural indicators can achieve the effect of preservation and monitoring through color changes in different pH environments by being compounded with other materials. Real-time monitoring of the freshness of meat, seafood, fruits, vegetables and dairy products can be achieved by utilizing the color reaction between different spoilage and deterioration signals and indicator films. Future research should focus on developing high-performance carriers and more stable indicators to expand the application scenarios of intelligent indicator films, thereby achieving purer, more efficient and stable green packaging applications.

Key words: bioactive ingredients; food intelligent indication film; carrier matrix; indicator; response mechanism

随着我国经济发展和生活水平的提升，食品安全品质问题日益受到社会关注。在日常食品消费中，由食品腐败变质引发的健康危害，是一类普遍存在的食品安全问题。肉类、水产等易腐败食品，常因微生物污染或氧化作用发生变质。这不仅导致食物浪费，更可能引发食源性疾病，对生命健康构成威胁，带来巨大的经济损失与安全风险[1]。因此，开发能够有效保障食品品质、减少食物浪费的食品包装技术显得尤为重要。

传统食品包装虽能在一定程度上延缓食品腐败变质，但却无法对包装内食品的品质变化进行实时监测。目前，消费者主要依赖感官检测方式或查看保质期标签来判定食品是否可食用，但这些方法具有明显的滞后性与不确定性，难以精准反映食品的实时新鲜度。新鲜度指示包装作为一种融合阻隔功能与新型智能检测性能的智能包装，通过实时响应食品腐败产生的环境信号（如 pH、挥发物质、温度变化），并以颜色变化等可视化方式直观指示食品新鲜度，为消费者提供了更便捷的服务[2−3]。

当前的智能指示膜可依据材料来源分为两类，一类以化学合成材料为基础构建而成；另一类则以生物活性物质（包括蛋白质、多糖、植物色素等）为基础构建。其中，生物活性物质不仅自身可降解、生物相容性好，其固有的抗氧化性还能协同保障食品安全；而化学合成材料存在可能对人体有害的安全隐患、降解能力差及功能稳定性不足等问题。因此，随着绿色消费理念的普及，开发生物活性物质作为智能指示膜的核心材料并最大程度减少化学添加剂的使用，成为绿色智能包装的必然路径[4]。本文旨在系统分析生物活性物质在智能指示膜可视化检测中的性能表现、显色机理、应用前景及面临的挑战，为未来开发更纯净、高效、稳定的绿色包装技术提供理论参考。

1 生物活性物质在智能指示膜中的应用

合适的载体基质和指示剂是食品智能指示膜的关键成分。相较于化学合成物质，生物活性物质因其绿色、安全、功能多样等优势，在智能指示膜中拥有更多发展空间。本节将介绍用于构建智能指示膜的天然载体基质材料，以及常用的天然指示剂。

1.1 指示膜中的载体基质材料

1.1.1 纤维素基载体材料　纤维素（Cellulose）作为自然界最丰富的多糖之一，因其优异的可降解性、生物相容性、可再生性以及独特的物理化学性质（如高结晶度、强机械性能、易于功能化），在食品智能指示膜领域占据着核心地位，常被作为一类特殊的、具有代表性的多糖基材单独研究。

纤维素基材料包括纤维素及其纳米形态的衍生物，凭借其优异的天然特性和可设计性，已成为构建智能新鲜度指示膜载体基质系统的关键材料[4]。作为指示膜的核心功能组件之一，纤维素基载体不仅为指示剂、生物活性响应单元以及辅助功能物质提供了不可或缺的结构支撑和负载平台，还显著影响着最终薄膜的关键物理性能（如机械强度、透明度、阻隔性）[5] 与功能性质（如指示响应的灵敏度、稳定性和特异性）[6]，解决了高效负载、均匀分散及响应促进等核心问题，奠定了高性能智能指示膜的物理与功能基础。

1.1.1.1 纳米纤维素基材　纳米纤维素基材指具有纳米尺寸及结构特征的纤维素材料，主要包括纤维素纳米纤丝（Cellulose Nanofibrils, CNF）、纤维素纳米晶体（Cellulose Nanocrystals, CNC）和细菌纳米纤维素（Bacterial Nanocellulose, BNC）[7]。纳米纤维素基材的纳米级纤维界面可提供丰富的羟基锚定位点，实现功能组分的高效负载与均匀分散；同时，网络孔隙可包埋脂溶性物质并调控释放；成膜后的高透明度确保颜色变化可直观检测[8−9]。

基于上述纳米纤维素基材的优异特性，研究者们将其用于新鲜度指示膜的制备，并取得了良好效果。Wang 等[10] 利用 CNF 负载姜黄素制得复合膜，该膜可因鱼类腐败产生的氨气（NH_3）灵敏变色指示新鲜度，且 CNF 网络可提供良好机械支撑。Miao 等[11] 制备了 BNC 负载姜黄素 Pickering 乳液，该膜可响应食品腐败 pH 变色指示新鲜度，同时 BNC 保护姜黄素活性并促其分散，使指示膜具有抗菌抗氧化功能。证明纳米纤维素在制备新鲜度指示膜过程中不仅具有高负载与响应特性，还可充分保护负载物质活性，且对脂溶性物质具有很好的负载效果。

1.1.1.2 纤维素衍生物基材　与纳米纤维素不同，纤维素衍生物基材指的是对天然纤维素做化学改性处理（如醚化、酯化）后得到的一类材料，主要包括羧甲基纤维素（Carboxymethyl Cellulose, CMC）、羟丙基

甲基纤维素(Hydroxypropyl Methylcellulose, HPMC)、甲基纤维素(Methylcellulose, MC)和乙基纤维素(Ethyl Cellulose, EC)等[12]。纤维素衍生物的性质与取代基的性质、基团被取代的程度有关[13]。通过化学修饰赋予其优质的水溶性或有机物溶解性，引入取代基团改善材料的热稳定性和机械性能，这些特性结合其易成膜性，使其在智能指示膜活性包装应用中极具潜力。

由于化学改性赋予的溶解性、稳定性及机械性能等优势，使得纤维素衍生物在智能指示膜制备中展现突出应用价值。Cao 等[14] 开发了基于 CMC 和卡拉胶的智能指示膜，负载花青素微胶囊监测冷藏牛肉。薄膜对牛肉腐败 pH 变化响应灵敏(粉红→灰紫→绿)，且 CMC 形成的致密网络提升了薄膜机械强度与水氧阻隔性。Zhao 等[15] 利用 CMC 构建智能指示膜，通过静电与氢键作用固定花青素，显著提升薄膜机械强度、稳定性及阻隔性，遇胺类物质 30 s 内变色，适用于高水分肉制品实时监测。Rukchon 等[16] 以 MC 为载体，固定 pH 敏感染料于滤纸基底。当鸡肉腐败产生 CO_2 溶解为 H^+时，标签颜色由亮绿变橙红，变化与腐败进程同步。

1.1.2　其他多糖基载体材料　除了纤维素，还有许多具有优异成膜性、生物相容性和功能多样的多糖，同样可作为构建食品智能指示膜的重要基质材料。根据是否具备响应刺激的能力，本文在讨论多糖材料时将其进一步分成两类，即主要提供结构支撑的基质型多糖和能响应环境刺激的响应型多糖。

1.1.2.1　基质型多糖　基质型多糖载体主要提供结构支撑和负载平台，其功能实现依赖所承载的活性物质响应。

壳聚糖(Chitosan)作为阳离子多糖基质，其丰富的氨基和羟基提供优异成膜性、生物相容性及内在广谱抗菌功能。氨基的质子化特性使其能通过静电作用或氢键高效负载阴离子指示剂(如花青素、姜黄素)，并维持其稳定性[17]。

淀粉(Starch)来源广、成本低、可完全降解，这些特性共同构成了其作为基质的核心优势。但纯淀粉膜亲水性强、易脆。常需物理改性(糊化)或与聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)等聚合物共混以提升机械性能和阻水性，从而有效承载指示剂并保障膜结构完整性[18]。

海藻酸盐(Alginate)其核心功能在于温和的离子交联能力(如 Ca^{2+})。这种基于“蛋盒”模型的交联可在室温下快速形成水凝胶网络，为热敏或 pH 敏感指示剂(如溴甲酚绿)提供理想的物理包埋与保护环境，确保其响应活性[4]。

1.1.2.2　刺激响应型多糖　相较于上述多糖主要作为支撑平台，响应机制依赖于其载负的指示剂，刺激响应型多糖载体不仅作为基质，其自身结构或官能团能感知特定环境刺激并发生可逆变化，直接贡献于智能响应。典型多糖包括：

果胶(Pectin)，根据其羧基酯化度(DE 值)进行区分。高甲氧基果胶(DE>50%)依赖低 pH/高糖凝胶化，而低甲氧基果胶(DE<50%)需二价阳离子(如 Ca^{2+})交联。这种 pH/离子强度双重敏感性使其能直接响应食品腐败微环境变化(如 pH 降低、离子释放)，常与指示剂协同提供多重信号输出[18]。

羧甲基纤维素(CMC)富含亲水性羧甲基($-CH_2COO^-$)，是强阴离子型聚电解质。其对 pH 及离子类型/强度高度敏感：低 pH 下(-COOH)链卷曲；高 pH 下($-COO^-$)链伸展溶胀；高价阳离子(如 Fe^{2+}、Ca^{2+})可致其沉淀或交联。这些显著的物理化学状态变化可直接用于可视化响应(如浊度、透明度变化)或放大负载指示剂的信号[19]。

1.1.3　蛋白质基载体材料　蛋白质在新鲜度指示膜中主要作为核心载体基质，构成膜的支撑骨架并负载指示剂。作为可降解的生物高分子，明胶(亲水性代表)[20] 与玉米醇溶蛋白(疏水性代表)[21] 因其显著不同的物化特性，成为适配不同食品环境的两类主流基质材料。

明胶(Gelatin)源于动物胶原蛋白水解，具有强亲水性、优异成膜性和高透明度的特点。其亲水特性利于指示剂接触水溶性腐败产物，而透明基质便于颜色观测[22]。其热熔-冷凝特性便于加工成型，使其特别适用于肉类、水产类高水分食品的新鲜度指示[23]。Zhao 等[24] 利用明胶亲水、透明且成膜性好的特点开发了负载花青素-Fe^{2+}螯合物的明胶/柠檬酸/壳聚糖交联膜用于猪肉监测，发现 Fe^{2+}螯合提升了花青素 pH 响应灵敏度。在冷藏猪肉实验中，膜色变化与挥发性盐基氮(Total Volatile Basic Nitrogen, TVB-N)、pH 同步，可有效指示新鲜度。

玉米醇溶蛋白(Zein)提取自玉米，以其天然强疏水性著称，能形成阻氧、阻水蒸气性能优良的致密膜[25]。该特性有效保护指示剂免受水分迁移影响，并显著延长指示膜在高脂/低水分食品(如奶酪、油炸制品)中的稳定性。玉米醇溶蛋白多通过乙醇溶液制备成膜；但该工艺需重点控制两方面问题：一是乙醇溶剂的残留风险，二是成膜后材料易出现的脆性缺陷。张星晖等[26] 利用静电纺丝技术制备了玉米醇溶蛋白纳米纤维膜，负载溴麝香草酚蓝指示剂监测金枪鱼品质。该膜充分发挥了玉米醇溶蛋白的疏水性和良好成膜性，形成稳定载体。在 4 ℃ 冷藏实验中，标签颜色(橙黄→绿→蓝)与金枪鱼 TVB-N 值、pH 变化高度同步，有效指示了其新鲜度变化过程。

1.2　指示膜中的天然指示剂

1.2.1　花青素类　花青素(Anthocyanidin)是一类广泛存在于植物中的水溶性类黄酮色素，主要来源于紫甘蓝、蓝莓、黑枸杞、葡萄、紫薯等植物[27]。花青素的 pH 响应机制来源于其分子结构中可离子化官能团在不同酸碱环境下的动态变化。如图 1(a)所示，

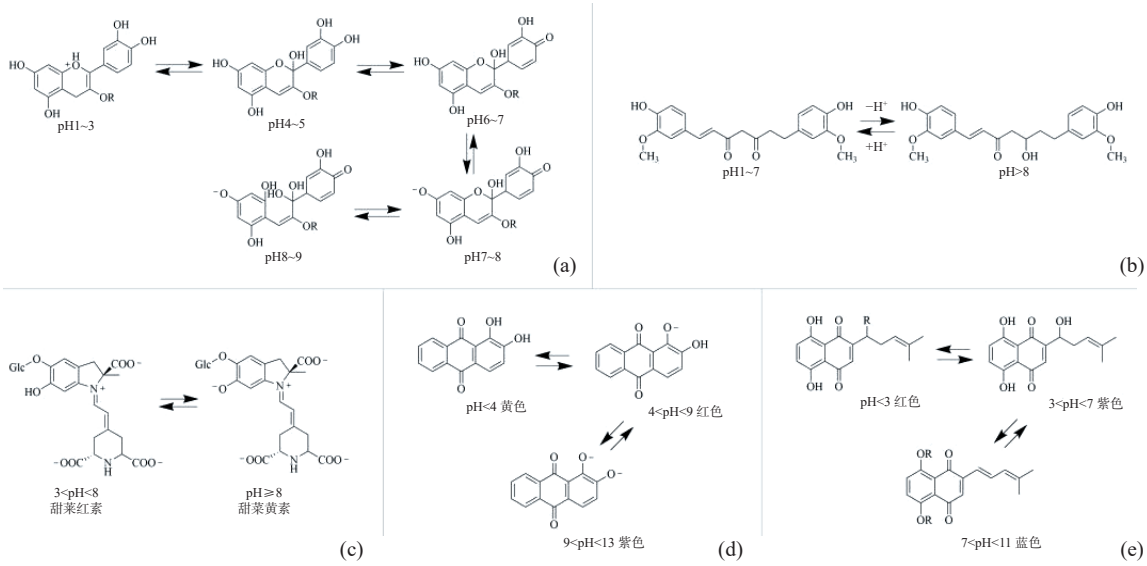


图 1 不同 pH 下花青素(a)[28]、姜黄素(b)[28]、甜菜素(c)[28]、茜素(d)[29] 和紫草素(e)[29] 的结构变化

Fig.1 Structural changes of anthocyanin (a)[28], curcumin (b)[28], betain (c)[28], alizarin (d)[29] and shikonin (e)[29] under different pH

在强酸性条件(pH<3)下以黄烊盐阳离子(flavylium cation)形式存在,呈鲜艳红色;随 pH 升高(pH4~7),逐渐转化为无色的甲醇假碱(carbinol pseudobase)或醌型碱(quinonoidal base),颜色褪去或转为紫色;碱性环境中(pH>7)则形成蓝色醌型碱或黄色查尔酮(chalcone),最终在强碱下降解[30−32]。花青素优势在于来源丰富、变色响应显著(红→紫→蓝/黄),兼具抗氧化与抗菌活性,可协同延长食品货架期[27];但其结构对光、热、氧气及金属离子(如 Fe^{3+})敏感,易发生降解或褐变,且在中性至碱性条件下稳定性显著降低,限制其应用范围[33−34]。

为了解决花青素稳定性不足的问题,研究者探索开发多种负载技术,提升了花青素在智能指示膜中的实用性能。Oktay 等[35] 将植物源花青素封装于沸石咪唑框架-8(A-ZIF-8)纳米晶体并负载于支撑层,构建多层智能膜检测鸡肉新鲜度。利用薄膜 a^*值与鸡肉 TVB-N 变化显著相关性(P<0.05)进行监测,通过 ZIF-8 增强显色稳定性,突破基质干扰。Miao 等[36] 以紫薯源花青素为指示剂,结合 PVA/蓖麻素复合基质开发智能膜,用于虾类等高蛋白食品新鲜度监测。该膜可实时指示新鲜度,兼具阻氧与抗氧化功。Shen 等[37] 设计聚乙二醇双(3-氨基丙基)醚(PGE)介导的醛响应膜(PVA/淀粉),特异性捕获草莓腐败标志物 2-己烯醛,触发 pH 下降驱动花青素变色(蓝→粉)。响应时间缩短至 3 min,解决了高湿环境下水蒸气渗透性不受影响的问题。

1.2.2 姜黄素类 姜黄素(Curcumin)是从姜黄(*Curcuma longa*)根茎中提取的疏水性多酚化合物,具有典型的二芳基庚烷结构(分子式 $C_{21}H_{20}O_6$)。姜黄素显色特性由烯醇式-酮式互变异构主导,如图 1(b)所示,在酸性至中性环境(pH3~7)呈亮黄色(酮式结构为主),碱性条件(pH>8)下酚羟基解离形成苯氧阴离子,转化为烯醇式结构,颜色转变为红棕色[38]。姜黄素具有显著的抗菌、抗氧化活性,可协同提升包装的保鲜功能;但水溶性极差(<1 μg/mL)、光热稳定性不足,且变色范围较窄(黄→红棕)[39−40],视觉对比度弱于花青素类指示剂。

为解决姜黄素水溶性差、光热稳定性不足及变色范围窄等问题,Xia 等[41] 将姜黄素与茜素复配于 PVA/CMC 膜,拓宽 pH 响应范围(2~13),协同实现猕猴桃 CO_2 梯度(2%~16%)的多级变色(深紫色→红棕色→黄色),优化膜 ΔE 达 65.06,灵敏度较单组分平均提升 57.7%。Yang 等[42] 以木质素磺酸和姜黄素协同增强海藻酸钠膜紫外屏蔽能力,降低光降解风险。该膜对虾腐败 TVB-N 响应灵敏(黄→棕),颜色变化与 TVB-N 积累直接相关,且水相工艺避免溶剂残留风险。李秋莹等[43] 通过静电纺丝技术将姜黄素负载于玉米醇溶蛋白/明胶纳米纤维膜,其疏水界面有效阻隔水分。应用于金枪鱼冷藏时,前 5 d 无明显颜色变化,第 6 d 膜色随挥发性胺释放由黄色变为红色,可精准指示腐败临界点。

1.2.3 甜菜素类 甜菜素(Betalains)是一类水溶性含氮色素,主要从红甜菜根(*Beta vulgaris*)、红心火龙果(*Hylocereus polyrhizus*)及仙人掌果(*Opuntia ficus-indica*)等植物中提取[44]。根据显色基团差异,可分为甜菜红素(Betalacyanins,红-紫色)和甜菜黄素(Betaxanthins,黄色)。甜菜素的颜色稳定性显著优于花青素,如图 1(c)所示,在 pH3~7 范围内保持结构稳定,呈现鲜明的紫红色;当 pH≥8 时,甜菜红素水解降解,主导色转为甜菜黄素的黄色[45]。甜菜素光热稳定性好,兼具抗菌、抗氧化及抗炎等生物活性,可协同提升包装功能[46];但其强亲水性易导致膜内迁移,且在强碱环境下不可逆降解,高浓度金属离子(如 Cu^{2+}、Fe^{3+})也可能引发褪色[47]。

基于甜菜素在中性至弱酸性环境下稳定显色，且光热稳定性好的优势，研究者开发出多款食品新鲜度指示膜。张方艳等[48]调控苋菜甜菜红素浓度（6%~14%），利用结冷胶/马铃薯淀粉载体的氢键作用增强分散稳定性。该膜在草鱼肉 4 ℃ 冷藏中可精准响应 TVB-N 超标，颜色由粉紫变为淡蓝，为水产保鲜提供可降解的视觉监测方案。Yang 等[49]以植物源甜菜红素为比色指示核心，结合玉米直链淀粉载体基质，开发双通道智能标签用于虾类新鲜度监测。甜菜红素的颜色响应协同荧光信号交叉验证虾腐败胺。双通道信号与 TVB-N 同步变化，通过比色-荧光双信号交叉验证显著提升复杂环境下的监测可靠性。Gao 等[50]研究火龙果皮甜菜红素与紫薯花青素按 1:3 复配，火龙果皮甜菜红素通过增强膜内部结构的致密性显著提升机械强度。该膜在猪肉腐败时颜色由红变黄绿，且在 pH2~13 范围内表现出敏感性。

1.2.4　醌类色素　醌类色素（Quinone pigments）主要包括萘醌类（如紫草素）和蒽醌类（如茜素），具有优异的光稳定性与抗氧化活性[51−52]。其显色机制基于 pH 驱动的酚羟基电离与结构互变[41]。该色素显著的光稳定性（优于花青素与甜菜素）、宽 pH 响应范围及抗菌活性；但部分醌类具潜在细胞毒性、水溶性差，且茜素强染色性可能干扰食品外观。

紫草素（Shikonin）从紫草科植物根部分离，其显色原理如图 1（d）所示，在酸性至中性环境（pH3~7）呈红色（酚羟基未电离）；碱性条件（pH7~11）逐步转化为单阴离子/双阴离子，颜色由紫红过渡至深蓝色[38]。Ezati 等[53]将紫草素负载于纤维素纸制备 pH 敏感指示膜，其颜色随 pH 升高从鲜红色变为暗红色。该膜色素稳定性高，对鱼肉和猪肉腐败过程响应灵敏，可实现新鲜度的实时监测。Roy 团队[51]将紫草素与花青素复配于 CMC/琼脂基质，实现 pH2~12 的宽范围响应，并显著增强抗菌活性。复配膜对 NH_3 响应灵敏，颜色变化显著，同时通过协同作用抑制微生物，突破单一色素的功能局限。

茜素（Alizarin）源自茜草根部，其显色原理如图 1（e）所示，酸性环境（pH<4）以中性分子形式存在（黄色）；随 pH 升高（pH4~9），单阴离子主导显红色；强碱性下（pH>9）形成双阴离子呈紫色[28]。边博雅等[29]将茜素与酰化花青素复配，通过氢键嵌入海藻酸钠/明胶水凝胶载体。茜素的醌式结构赋予薄膜酸性环境高灵敏度响应，其质子化作用驱动膜色随蓝莓腐败酸化由紫色（新鲜）向橙色（腐败）转变。复配膜 ΔE 值>6 且与菌落总数强关联，同时醌基显著提升抗氧化性（DPPH 自由基清除率>80%），实现保鲜-监测双功能集成。

2　智能指示膜的不同显色机制

2.1　pH 响应

天然色素（主要为花青素、甜菜素、姜黄素）的 pH 响应机制源于其分子结构中可离子化官能团（如羟基、氨基）在不同酸碱环境下的动态变化，通过质子化/去质子化作用改变分子共轭体系的电子分布，进而引发光吸收光谱偏移并呈现显著颜色差异。具体而言，该机制包含三个核心层面：首先是质子化态对显色的直接调控，比如花青素在酸性条件下会以黄烊阳离子形式存在，呈现红色，而在碱性环境中则会转为醌式碱基，颜色随之变为蓝色或绿色；其次是结构异构化的影响，例如姜黄素在碱性条件下会发生烯醇式与酮式的互变，颜色从黄色转变为红褐色，甜菜素则会在强碱性环境下发生降解并出现褪色；第三是载体的协同稳定作用，纤维素或多糖基载体能够通过氢键网络增强色素的稳定性。

当富含蛋白质的食品（如肉类、海鲜、乳制品）腐败时，微生物代谢产生挥发性含氮化合物 NH_3、三甲胺（Trimethylamine，TMA）、二甲胺等，导致包装微环境 pH 显著升高。pH 响应型智能指示膜通过其功能层中的天然色素实时捕获这一化学信号，触发上述分子结构变化，产生肉眼可辨的颜色跃迁（如：肉品新鲜态→腐败态：指示膜红→绿/蓝），从而实现对食品新鲜度的无损、可视化监测[38,54]。其响应机制如图 2（a）所示。

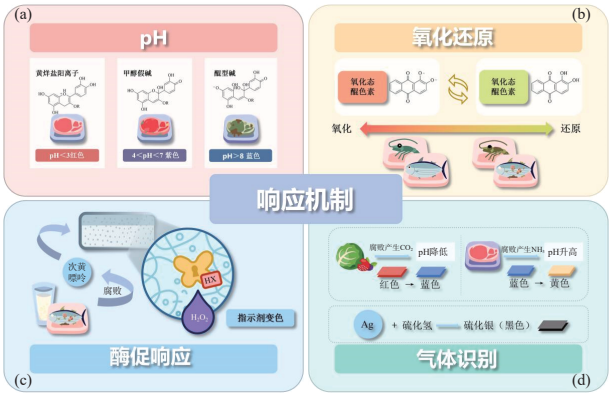


图 2　智能指示膜的四种响应机制

Fig.2　Four response mechanisms of intelligent indicator films

注：（a）pH 响应机制；（b）氧化还原响应机制；（c）酶促响应机制；（d）气体识别响应机制。

2.2　氧化还原

氧化还原响应机制的核心在于指示剂分子自身发生可逆的氧化/还原反应，导致其电子结构和共轭体系改变，进而产生显著颜色变化。该机制主要利用醌类色素作为敏感元件，直接响应食品腐败过程中产生的氧化性或还原性物质[55]。

醌类色素作为氧化还原响应的核心指示剂，其显色机制源于醌式（Quinone）与氢醌式（Hydroquinone）结构的可逆转换。在氧化态下，醌式结构的扩展共轭体系吸收可见光呈现深红、紫或蓝色；当遭遇食品腐败释放的硫化氢（H_2S）、甲硫醇等强还原性物质时，醌式结构被还原为氢醌式，共轭体系断裂，颜色褪为无色或浅黄色。响应机制如图 2（b）所示。

2.3　酶促反应

酶促响应机制通过在指示膜上固定化特异性氧

化酶或水解酶，催化目标底物转化为反应产物，触发共固定化学指示剂的可视化变色，实现对食品新鲜度指标的高灵敏、高选择性监测[56]。在实际应用中，不同类型食品腐败会释放特定分子：以鱼类食品为例，其腐败变质时产生的次黄嘌呤扩散至指示膜后，固定化的黄嘌呤氧化酶会对其进行特异性催化，产生 H_2O_2；乳制品腐败时产生的尿素扩散至指示膜后，固定化的尿素酶会对其进行特异性催化，生成 NH_3。Lin 等[57] 在静电纺壳聚糖纤维上固定化漆酶作为指示膜，通过固定化漆酶催化氧化愈创木酚着色剂，并利用叠氮化钠作为抑制剂延长指示膜的着色率和活化能，构建了调控显色的动力学系统，为智能包装提供精准的食品质量监测功能。

凭借酶-底物特异识别的分子特性，可实现传统方法难以企及的精准监测。尽管酶促机制具备显著的特异性优势，其实际应用仍受限于酶的环境敏感性和级联反应速率。其响应机制如图 2(c)所示。

2.4 气体识别

气体分子识别机制通过指示剂与腐败挥发物（如 NH_3、H_2S、CO_2）的特异性结合触发色变：质子敏感染料响应变化，例如胺类物质导致 pH 升高，染料颜色从红色转变为蓝色；CO_2 导致 pH 降低，染料颜色从蓝色转变为黄色；纳米粒子则通过沉淀反应显色，银离子与硫化氢发生反应，生成黑色的硫化银。此外，仿生的金属卟啉类材料可通过配位作用捕获 H_2S。刺激响应型多糖基载体通过微孔控释优化气体传质效率[58]。

气体识别机制因无损检测特性和多气体覆盖能力，可覆盖肉类的胺类气体、海鲜的 H_2S 气体、果蔬的 CO_2 气体检测，成为智能包装核心方案，但面临湿度干扰与交叉响应挑战。研究发现，可通过开发金属有机骨架材料（MOFs）提升气体选择性；设计疏水涂层载体增强环境稳定性等实现突破。其响应机制如图 2(d)所示。

3 智能指示膜在不同食品中的应用

3.1 肉类新鲜度监测

肉类新鲜度指示膜主要针对肉类腐败过程中产生的关键信号—TVB-N 和脂肪氧化产物，利用这些物质引发的 pH 变化或气体信号，驱动指示膜发生可见的颜色变化（如黄→绿→蓝或紫→黄等），进而实时反映肉类腐败程度，实现从生产到消费全链的实时品质监控（表 1）。

根据 pH 驱动的指示原理，Cao 等[14] 利用玉米蛋白和结冷胶封装紫甘蓝-火龙果皮复合花青素，开发出 pH 敏感型微胶囊，并将其与卡拉胶-CMC 复合制成智能指示膜。该膜颜色（粉→紫→蓝绿→黄）随冷藏牛肉 pH 变化，精准关联牛肉次级新鲜（第 4 d）和腐败（第 7 d）阶段，且提升了花青素稳定性及膜性能，为肉类保鲜提供可视化监测手段。

除 pH 信号外，针对肉类腐败产生的气体信号，如 NH_3，研究人员也研发了高灵敏度的传感型指示标签。Oktay 等[35] 开发了一种基于 BNC、PVA 和花青素掺杂 A-ZIF-8 的多层智能标签。优化后的薄膜对 NH_3 传感性能显著提升。应用于 4 ℃ 储存的鸡

表 1 肉类、水产品、果蔬及乳制品中智能指示膜的应用实例

Table 1 Application examples of smart indicator films in meat, seafood, fruits, vegetables, and dairy products

分类	对象	核心腐败指标	指示剂	基材	颜色变化	参考文献
肉类	牛肉	pH、TVB-N、总活菌数、TBARS	复合花青素微胶	卡拉胶/CMC复合膜	粉红→灰紫→绿	[14]
	鸡肉	TVB-N、微生物总数	花青素	BNC/PVA多层膜	粉红→深蓝	[35]
	猪肉	TVB-N、pH	蓝莓花青素/Fe^{2+}螯合物	明胶/柠檬酸/壳聚糖交联膜	玫瑰红→深红→紫→蓝	[24]
	猪肉	TVB-N	火龙果皮甜菜红素/紫薯花青素	卡拉胶/甘油复合膜	红→紫红→蓝紫→蓝绿→黄绿	[50]
	猪肉	TVB-N、pH	紫草素	纤维素滤纸	鲜红→暗红	[53]
水产品	虾	TVB-N、pH	紫薯花青素	PVA/riclin复合膜	紫红→紫→蓝绿	[36]
	巴沙鱼	TVB-N、pH	姜黄素	细菌纤维素复合Pickering乳液	黄→深黄	[11]
	金枪鱼	TVB-N、pH	姜黄素与茜素	玉米醇溶蛋白/明胶	黄→红	[43]
	三文鱼	胺类	花青素	果胶/羧甲基壳聚糖	红→灰紫	[61]
	虾	TVB-N	姜黄素	赖氨酸改性海藻酸钠/木质素磺酸复合膜	黄→浅棕→深棕	[42]
	虾	TVB-N	甜菜红素	玉米直链淀粉	砖红→黄	[49]
果蔬	草莓	醛类气体	花青素/姜黄素复合物	PVA/可溶性淀粉/PGE复合膜	蓝→粉	[37]
	猕猴桃	pH/氨	茜素/姜黄素复合物	PVA/CMC复合膜	深紫→红棕→黄	[41]
	蓝莓	CO_2/乙烯	酰基化蓝莓花青素/茜素复合物	海藻酸钠/明胶/甘油水凝胶	紫→橙	[29]
乳制品	巴氏杀菌乳	CO_2浓度变化	蓝莓花青素	PVA/大豆分离蛋白复合基质	棕→红	[31]
	牛奶	pH	花青素	壳聚糖/纤维素滤纸	紫→无色	[66]

注：TVB-N：挥发性盐基氮（Total Volatile Basic Nitrogen）；CMC：羧甲基纤维素（Carboxymethyl Cellulose）；BNC：细菌纳米纤维素（Bacterial Nanocellulose）；PVA：聚乙烯醇（Polyvinyl Alcohol）；TBARS：硫代巴比妥酸反应物（Thiobarbituric Acid Reactive Substances）；PGE：聚乙二醇双（3-氨丙基）醚（polyethylene glycol bis(3-aminopropyl)ether）。

胸肉，其色差（ΔE^*）和红绿色度（a^*）值与微生物总量及 TVB-N 含量高度相关，通过可视化颜色变化直接指示新鲜度。该技术为肉类智能包装提供了高灵敏度、便携化的指示方案。

现有肉类新鲜度指示膜已实现了通过响应肉类腐败过程中产生的腐败信号，反映肉类腐败的程度。然而，目前研究集中于猪肉、牛肉和鸡肉等肉品，而羊肉、鸭肉等常见肉品的腐败标志物响应情况尚未明确；部分关键材料制备成本较高，难以满足规模化工业生产需求。因此，需要针对不同肉类腐败标志物差异优化材料配方，拓展指示膜在更多肉品中的适用性，开发低成本材料，降低产业化门槛。

3.2　水产品新鲜度监测

水产品新鲜度监测指示膜通过检测 TMA 和 NH_3 腐败标志物，利用天然色素的 pH 响应或 MOF 等智能材料对特定气体的显色反应实现实时监测[19,59]。

为实现新鲜度检测快速响应，Kang 等[60] 开发了基于铜基金属有机骨架（Cu-MOF）的淀粉/PVA 复合智能标签。该材料接触腐败标志物 NH_3 后 1 min 内肉眼可见的由绿变深蓝，在 4 ℃ 和 28 ℃ 下颜色变化与虾腐败进程高度吻合。该膜抑菌率超 92%，可延长虾保质期，克服天然色素指示膜缺陷，为高水分海鲜提供稳定智能包装方案。

针对水产品的保鲜需求，Sun 等[61] 开发以果胶/羧甲基壳聚糖为基础、复合负载花青素多孔微球和丁香精油的多功能智能指示标签，经优化具显著抗菌活性。用于冷藏三文鱼保鲜，保质期从 4 d 延长至 9 d，可实时监测新鲜度，为水产品保鲜提供集成创新方案。

水产品新鲜度指示膜不仅可快速响应，且已从单一功能膜转向多功能集成。与肉类新鲜度指示膜存在相似问题，水产品指示膜覆盖品类较窄，多集中于虾和鱼，而贝类缺乏有效响应。此外，现有膜材料对 TMA 响应灵敏度仍低于 NH_3，难以精准捕捉部分鱼类早期腐败信号。需拓展指示膜水产品品类适配范围，设计贝类等专用响应敏感材料；通过配方优化，增强对 TMA 的响应灵敏度，实现水产品腐败早期精准预警。

3.3　果蔬采后品质监测

果蔬活性包装指示膜需协同解决采后呼吸代谢调控[62]、乙烯/病原菌抑制[63] 及腐败可视化监测[64] 三大挑战。其通过响应果蔬贮藏微环境中 CO_2/O_2 浓度变化、特征挥发性有机物（VOCs）或病原微生物代谢产物（pH 变化），触发颜色/荧光变化，并结合缓释抗菌/抗氧化活性物质延长货架期。

针对呼吸跃变型果蔬的呼吸代谢调控与可视化监测需求，Xia 等[41] 开发了基于茜素与姜黄素双天然色素的高性能比色指示膜，以 PVA 和 CMC 复合基质为载体，经响应面法优化工艺，可灵敏响应猕猴桃呼吸代谢释放的 2%~16% CO_2 梯度浓度变化，触发黄→橙→红→棕多级颜色转变。该膜机械柔韧性、阻湿性优异，25 ℃ 储存时色差较对照组提升 98.5%，能精准指示最佳食用窗口期。复合基质使薄膜熔融温度超 177 ℃，保障高湿度环境长期稳定，为呼吸跃变型果蔬提供智能监测方案。

为覆盖非跃变型果蔬的腐败可视化监测场景，并解决传统膜高湿失效问题，Shen 等[37] 开发了一类基于花青素/姜黄素复合天然色素的新型气敏膜，以 PVA/可溶性淀粉复合基质为载体，引入 PGE 作为醛气响应介质。该膜通过特异性捕获草莓腐败标志性气体 2-己烯醛，触发 PGE 介导的 pH 下降机制，驱动色素发生显著颜色变化，花青素膜由蓝色变为粉色，姜黄素膜由棕色变为黄色。在室温储存条件下，膜色变化精准区分草莓新鲜（0 d）、次新鲜（3 d）与腐败（5 d）状态，其响应与感官评分、硬度及丙二醛含量变化高度一致。复合基质赋予薄膜优异的防水性能，克服了传统指示膜在高湿环境中失效的缺陷，为易腐果蔬提供了一种低成本、用户友好且适配非跃变型水果特性的实时监测方案。

果蔬指示膜已实现跃变型与非跃变型果蔬的全覆盖，有效延长果蔬货架期。目前果蔬新鲜度指示膜多聚焦于“监测”功能，可以进一步结合乙烯吸附、病原体抑制等保鲜功能，开发多功能集成膜。

3.4　乳制品新鲜度检测

相较于肉类、海鲜及果蔬的成熟监测体系，乳制品智能指示膜的研究仍处于探索阶段。该类薄膜主要通过捕获微生物代谢导致的 pH 下降或特征挥发性酸，触发花青素等天然色素的显色变化[65]。丁凯炜等[31] 以大豆分离蛋白/PVA 为基质和蓝莓花青素为原料制备了 pH 智能指示膜，在巴氏杀菌乳的新鲜度检测中展现出明显的色差变化；Muhammad 等[66] 研究成功开发了一种基于花青素和滤纸的通过 pH 驱动的颜色变化牛奶新鲜度传感器，结合壳聚糖增强稳定性，为智能包装和减少食物浪费提供了创新解决方案。当前挑战集中于乳品高水分环境对指示剂稳定性的影响，以及低浓度腐败标志物的检测灵敏度。未来需开发疏水型载体、仿生气敏材料及抑菌-指示双功能系统，以推动该领域的应用进程。

4　结论与展望

近年来，生物活性物质凭借着可降解性和可再生性等优势，在食品新鲜度指示膜制备研究中显现巨大的应用潜力，但其在食品智能指示膜中的全面工业化应用仍面临多重挑战。一方面，花青素、姜黄素等天然色素对光、热、氧及 pH 高度敏感，易导致指示膜颜色变化不稳定，影响指示准确性；另一方面，多功能整合过程中组分相容性差，且高负载需求会削弱薄膜物理性能；此外，当前研究多集中于肉类及水产品，针对果蔬和乳制品的应用开发相对滞后。针对上述问题，首先应提升天然色素稳定性，通过纳米包埋、

微胶囊化等技术，减少其与包装外界环境的接触。其次，优化多功能整合策略，深入研究组分间相互作用机制，采用分层结构设计提高薄膜整体性能。同时，拓展应用场景，针对不同食品类型开发专用指示膜，满足多样化需求。未来需进一步深入研究天然色素降解机理以优化稳定剂，分析多功能组分对薄膜性能的影响并提出优化策略，同时评估智能指示膜在不同食品中的应用潜力，推动其市场化，助力食品安全与绿色包装创新。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 安朝霞, 苗雨阳, 杜玉婉, 等. 食品腐败变质生物因素相关机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 86−93. [AN Zhaoxia, MIAO Yuyang, DU Yuwan, et al. Research progress on the mechanism related to biological factors of food spoilage and deterioration[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(1): 86−93.]

[2] 王艳娟, 王桂英, 王艺萌. 食品类智能包装技术研究进展[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 6−12. [WANG Yanjuan, WANG Guiying, WANG Yimeng. Research progress of intelligent packaging technology for food[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 6−12.]

[3] 赵冬艳, 孙金才, 陈纪算. 新鲜度指示型包装技术在生鲜食品的应用进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(1): 1−9. [ZHAO Dongyan, SUN Jincai, CHEN Jisuan. Application progress of freshness indicator packaging technology in fresh food[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2022, 41(1): 1−9.]

[4] SHI S, WU X D, WANG Y et al. Sodium-alginate-based indicator film containing a hydrophobic nanosilica layer for monitoring fish freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265(Pt 1): 130714.

[5] CHEN Y, ZHANG Y T, LONG J, et al. Multiscale cellulose-based optical management films with tunable transparency and haze fabricated by different bamboo components and mechanical defibrillation approaches[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348(Pt A): 122811.

[6] 陈赛艳, 赵正禾, 胥小清, 等. 紫甘蓝花青素智能指示膜的制备及其在牛乳新鲜度监测中应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 228−236. [CHEN Saiyan, ZHAO Zhenghe, XU Xiaoqing, et al. Preparation of anthocyanin smart indicator film for purple cabbage and its application in monitoring the freshness of milk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(24): 228−236.]

[7] ISOGAI A. Emerging nanocellulose technologies: recent developments[J]. Advanced Materials, 2021, 33(28): 2000630.

[8] 酒兆瑞, 张权, 苗长林, 等. 纳米纤维素的制备及性能调控研究进展[J]. 化工进展, 2026, 45(1): 288−299. [JIU Zhaorui, ZHANG Quan, MIAO Changlin, et al. Research progress on the preparation and performance regulation of nanocellulose[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2026, 45(1): 288−299.]

[9] 任海伟, 徐志航, 邢雪晔, 等. 纳米纤维素的制备、结构性质及应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 215−224. [REN Haiwei, XU Zhihang, XING Xueye, et al. Research progress on the preparation, structural properties and applications of nanocellulose[J]. Food Science, 2023, 44(17): 215−224.]

[10] WANG S Y, MA Y, WANG F J, et al. Development of cellulose-based self-healing hydrogel smart packaging for fish preservation and freshness indication[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122806.

[11] MIAO W T, GU R H, SHI X T, et al. Indicative bacterial cellulose films incorporated with curcumin-embedded Pickering emulsions: Preparation, antibacterial performance, and mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153284.

[12] CHENG W K, ZHU Y, JIANG G Y, et al. Sustainable cellulose and its derivatives for promising biomedical applications[J]. Progress in Materials Science, 2023, 138: 101152.

[13] 张军, 张金明, 肖鹏, 等. 可熔融加工的新型纤维素衍生物的结构设计、合成与性能[C]//2015 年全国高分子学术论文报告会, 2015: 5. [ZHANG Jun, ZHANG Jinming, XIAO Peng, et al. Structural design, synthesis and properties of novel cellulose derivatives for melt processing[C]//2015 National Polymer Academic Paper Conference, 2015: 5.]

[14] CAO Y J, GOU Q M, SONG Z Y, et al. Smart carrageenan/carboxymethyl cellulose films combined with zein/gellan gum microcapsules encapsulated by composite anthocyanins for chilled beef freshness monitoring[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110059.

[15] ZHAO Y L, LI C, XIA X D, et al. Eco-friendly and intelligent cellulosic fibers-based packaging system for real-time visual detection of food freshness[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 490: 144712.

[16] 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.

[17] 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 Xin, LI Tingting, FENG Longfei, et al. Research on monitoring the freshness of clams by chitosan-based smart indicator film loaded with blueberry anthocyanins[J] Packaging Engineering, 2023, 44(11): 10-19.]

[18] CAO Y J, SONG Z Y, DONG C J, et al. Potato oxidized hydroxypropyl starch/pectin-based indicator film with Clitoria ternatea anthocyanin and silver nanoparticles for monitoring chilled beef freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 273(Pt 2): 133106.

[19] WANG Y, ZHANG J, ZHANG L F. An active and pH-responsive film developed by sodium carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol doped with rose anthocyanin extracts[J]. Food Chemistry, 2022, 373(Pt B): 131367.

[20] YASHWANT A S, KASHYAP P, GOKSEN G. Recent advances in the improvement of protein-based edible films through non-thermal and thermal techniques[J]. Food Bioscience, 2023, 49: 103032.

[21] 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 Qiaomin, GUO Zonglin, DONG Chunjuan, et al. Preparation, characterization of carrageen-based composite anthocyanin microcapsule indicator film and its monitoring of freshness of chilled beef[J]. Food Science, 2023, 44(9): 154−162.]

[22] KIM H J, ROY S, RHIM J W. Gelatin/agar-based color-indicator film integrated with *Clitoria ternatea* flower anthocyanin and

zinc oxide nanoparticles for monitoring freshness of shrimp[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107294.
[23] 石彤, 胡慧玲, 熊冶渝, 等. 高灵敏度指示膜对鱼肉新鲜度的监测及其机理分析[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 150−158. [SHI Tong, HU Huiling, XIONG Zhiyu, et al. Monitoring of fish freshness by high-sensitivity indicator film and its mechanism analysis [J]. Food Science, 2023, 44(13): 150−158.]
[24] ZHAO H L, LIU W, MIN C J, et al. pH-responsive color indicator film based on gelatin/chitosan cross-linking with anthocyanin-Fe^{2+} chelate for pork freshness monitoring[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 134: 110895.
[25] 赵文鹏, 刘雅楠, 张迅, 等. 负载花青素的玉米醇溶蛋白纳米纤维膜监测猪肉新鲜度[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 83−90. [ZHAO Wenpeng, LIU Yanan, ZHANG Xun, et al. Monitoring of pork freshness by zeolinolytic protein nanofiber membrane loaded with anthocyanin[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2023, 14(2): 83−90.]
[26] 张星晖, 李婷婷, 励建荣, 等. 溴麝香草酚蓝/玉米醇溶蛋白指示标签对金枪鱼新鲜度的监测[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 226-233. [ZHANG Xinghui, LI Tingting, LI Jianrong, et al. Monitoring of Tuna freshness by bromothymol blue/zeolinolytic protein indicator tags[J]. Food Science, 2021, 42(19): 226-233.]
[27] WANG B L, TANG X, MAO B Y, et al. Anti-aging effects and mechanisms of anthocyanins and their intestinal microflora metabolites[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(8): 2358−2374.
[28] EZATI P, RHIM J W, MORADI M, et al. CMC and CNF-based alizarin incorporated reversible pH-responsive color indicator films[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116614.
[29] 边博雅, 李洋, 张可欣, 等. 添加酰基化花青素和茜素的pH响应型复合水凝胶指示膜对蓝莓的保鲜和新鲜度监测[J]. 复合材料学报, 2025, 42(12): 7132−7149. [BIAN Boya, LI Yang, ZHANG Kexin, et al. Monitoring of preservation and freshness of blueberries by Ph-responsive composite hydrogel indicator film with acylated anthocyanins and alizarin[J]. Journal of composite materials, 2025, 42(12): 7132−7149.]
[30] DAI W, YIN P, LIN Q L, et al. Black goji anthocyanin-loaded emulsion film stabilized by rice protein hydrolysate complexes as pH-sensitive indicator for salmon freshness[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 47: 101419.
[31] 丁凯炜, 吕长鑫, 贾凤维, 等. 大豆分离蛋白基pH值智能指示膜的制备及其对乳品新鲜度的监测[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 11−18. [DING Kaiwei, LÜ Changxin, JIA Fengwei, et al. Preparation of intelligent ph value indicator membrane based on soy protein isolate and its monitoring of dairy freshness[J]. Food Science, 2025, 46(6): 11−18.]
[32] 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 Yong, LI Li. Research progress of ph sensitive food freshness indicator labels and their applications[J]. Meat Research, 2022, 36(11): 52−59.]
[33] LIANG A Q, LEONARD W, BEASLEY J T, et al. Anthocyanins-gut microbiota-health axis: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(21): 7563−7588.
[34] 雷桥, 张文惠. 负载天然色素的生物基智能包装指示器研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(1): 20−31. [LEI Qiao, ZHANG Wenhui. Research progress of bio-based smart packaging indicators loaded with natural pigments[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(1): 20−31.]
[35] OKTAY C, KAHYAOGLU L N, MORADI M. Food freshness monitoring using poly(vinyl alcohol) and anthocyanins doped zeolitic imidazolate framework-8 multilayer films with bacterial nanocellulose beneath as support[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 319: 121184.
[36] MIAO Y Q, CHEN Z H, ZHANG J R, et al. Exopolysaccharide riclin and anthocyanin-based composite colorimetric indicator film for food freshness monitoring[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 314: 120882.
[37] SHEN D B, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. New gas sensitive films containing anthocyanin/curcumin for real-time monitoring of strawberries quality[J]. Food Bioscience, 2024, 59(2): 104124.
[38] GUO C, LI Y, ZHANG H, et al. A review on improving the sensitivity and color stability of naturally sourced pH-sensitive indicator films[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(4): e13390.
[39] WANG W Q, LIU X W, GUO F, et al. Biodegradable cellulose/curcumin films with Janus structure for food packaging and freshness monitoring[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 324: 121516.
[40] 王倩, 薛舟, 王涛, 等. 姜黄素在食品包装中的应用进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 313−323. [WANG Qian, XUE Zhou, WANG Tao, et al. Application progress of curcumin in food packaging[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(7): 313−323.]
[41] XIA S, FANG X J, WU W J, et al. Preparation and characterization of novel natural pigment-indicating film: Application in kiwifruit freshness monitoring[J]. Food Chemistry, 2025, 463(Pt 4): 141491.
[42] YANG M L, KOU X H, GAO Y, et al. Development of a novel curcumin loaded lysine modified alginate intelligent film reinforced by lignosulfonic acid with high color stability for monitoring shrimp freshness[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 51: 101278.
[43] 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 Qiuying, YU Xinrui, LIU Zheng, et al. Preparation of curcumin/alizarin ph-sensitive protein fiber membrane and its indication effect on tuna freshness[J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 260−269.]
[44] RAHIMI P, ABEDIMANESH S, MESBAH-NAMIN S A, et al. Betalains, the nature-inspired pigments, in health and diseases [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(18): 2949−2978.
[45] WU H, CHEN L, LI T, et al. Development and characterization of pH-sensing films based on red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) peel treated by high-pressure homogenization for monitoring fish freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 154: 110119.
[46] NIRMAL N P, MEDHE S, DAHAL M, et al. Betalains protect various body organs through antioxidant and anti-inflammatory pathways[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(3): 1109−1117.
[47] 余惠容, 张利, 李兴梅, 等. 基于甜菜红素的pH指示膜性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 190−196. [YU Huirong, ZHANG Li, LI Xingmei, et al. Research on the performance of pH indicator film based on betacyanin[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(7): 190−196.]
[48] 张方艳, 刘雪娇, 郭娜, 等. 甜菜红素浓度对pH指示膜的影响及应用[J]. 合肥师范学院学报, 2024, 42(3): 20−24,60. [ZHANG F Y, LIU X J, GUO N, et al. Effect of betalain concen-

tration on pH indicator film[J]. Journal of Hefei Normal University, 2024, 42(3): 20−24,60.]
[49] YANG Z, TONG F, PENG Z W, et al. Development of colorimetric/fluorescent two-channel intelligent response labels to monitor shrimp freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108125.
[50] GAO L, LIU P P, LIU L L, et al. κ-Carrageenan-based pH-sensing films incorporated with anthocyanins or/and betacyanins extracted from purple sweet potatoes and peels of dragon fruits[J]. Process Biochemistry, 2022, 121: 463−480.
[51] ROY S, KIM H J, RHIM J W. Effect of blended colorants of anthocyanin and shikonin on carboxymethyl cellulose/agar-based smart packaging film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 305−315.
[52] 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 Bo, LI Wen, YANG Xin, 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.]
[53] EZATI P, BANG Y J, RHIM J W. Preparation of a shikonin-based pH-sensitive color indicator for monitoring the freshness of fish and pork[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127995.
[54] ZHANG W D, LIU W D, QI X, et al. Natural pigment-based smart packaging films for real-time food spoilage monitoring: Compositions, color-changing mechanisms, applications, and challenges [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2025, 49(4): 101484.
[55] CHENG J, SHEN Y, GU Y L, et al. Metal-polyphenol multistage competitive coordination system for colorimetric monitoring meat freshness[J]. Advanced Materials, 2025, 37(21): 2503246.
[56] HUANG B C, ZHANG K X, KWADZOKPUI B A, et al. Real-time monitoring and rapid determination of pork freshness using a colorimetric sensor array based on porphyrin and ph indicator ligand combination[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(18): 11327−11339.
[57] LIN C X, HSU H H, CHANG Y H, et al. Expanding the applicability of an innovative laccase tti in intelligent packaging by adding an enzyme inhibitor to change its coloration kinetics[J]. Polymers, 2021, 13(21): 3646.
[58] 夏菲, 李文博, 董越, 等. 生物胺荧光响应膜在肉及肉制品新鲜度检测中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(11): 42−51. [XIA Fei, LI Wenbo, DONG Yue, et al. Research progress on the application of bio-amine fluorescent response membranes in the freshness detection of meat and meat products[J]. Meat Research, 2022, 36(11): 42−51.]
[59] 董盛叶, 张雅琴, 符招弟, 等. 基于胺响应的花青素水凝胶监测鱼/虾新鲜度的方法[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 316−323. [DONG Shengye, ZHANG Yaqin, FU Zhaodi, et al. A method for monitoring the freshness of fish/shrimp based on amine-responsive anthocyanin hydrogel[J]. Food Science, 2023, 44(18): 316−323.]
[60] KANG Y F, ZHAO D D, CAI D H, et al. Novel copper-based metal-organic skeleton smart tags that respond to ammonia for real-time visual freshness monitoring of shrimp[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153388.
[61] SUN J L, ZHOU Q, WEI Z H, et al. Multifunctional intelligent indication labels featuring antibacterial properties based on pectin/carboxymethyl chitosan incorporated with porous microspheres loaded with anthocyanins: A new approach for salmon preservation and freshness detection[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110571.
[62] XU H S, QUAN Q, CHANG X, et al. A new nanohybrid particle reinforced multifunctional active packaging film for efficiently preserving postharvest fruit[Z]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109017.
[63] ZHENG S W, WANG D F, REN L K, et al. A new paradigm for smart packaging: A dual-channel freshness monitoring platform based on aerogels of sodium alginate-anthocyanin complex with high colorimetric sensitivity and stability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267(Pt 1): 131485.
[64] 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.
[65] 韩婷婷, 孙冲, 王道营, 等. 可视化智能包装在食品新鲜度监测中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(12): 46−53. [HAN Tingting, SUN Chong, WANG Daoying, et al. Research progress on the application of visualized intelligent packaging in food freshness monitoring[J]. Meat Research, 2021, 35(12): 46−53.]
[66] MUHAMMAD N S, ADEEL A, MUHAMMAD A, et al. Chemically modified filter paper with Jaman fruit extract for visual sensing of milk freshness[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142181.