

可视化智能包装在减少食物浪费中的应用

高琳¹, 易凯¹, 蔡锋¹, 徐胜华¹, 吴敏¹, 鲁鹏^{1,2}

(1.广西大学 轻工与食品工程学院 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室, 南宁 530004;

2.江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室(南京林业大学), 南京 210037)

摘要: **目的** 研究光学系统领域内用于监测水果、蔬菜、肉类等食品新鲜度的可视化智能包装技术手段, 掌握相关原理, 从而减少食物浪费。 **方法** 简述智能包装技术的概念和特点, 阐明智能包装指示食物新鲜度的现状, 根据食物不同特点, 对几种不同指示新鲜度的应用进行阐述。 **结果** 智能包装的应用便于食品质量检测, 可实现产品的可追溯性, 大大提高了包装的智能性和信息性, 促进了食品安全检测系统的发展。 **结论** 智能包装有助于消费者对食物可食性的判断, 从而减少食源性疾病的发生和食物的浪费。智能包装在国内的发展仅处于起步阶段, 需要国家的大力支持以及包装科研者的不懈努力, 才能促进智能包装在食品领域更好地发展。

关键词: 光学系统; 食物浪费; 智能包装; 食品新鲜度; 食品质量检测

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)07-0125-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.017

Application of Visible Intelligent Packaging in Reducing Food Waste

GAO Lin¹, YI Kai¹, CAI Feng¹, XU Sheng-hua¹, WU Min¹, LU Peng^{1,2}

(1.Institute of Light Industry and Food Engineering, Guangxi Key Laboratory of Clean Pulp and Papermaking and Pollution Control, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.Jiangsu Provincial Key Laboratory of Pulp and Paper Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

ABSTRACT: The work aims to study the visual intelligent packaging technology and means in the field of optical system for monitoring the freshness of fruits, vegetables and meat, and master relevant principles to reduce food waste. Concept and characteristics of intelligent packaging technology were briefly introduced. The present situation of food freshness indicated by intelligent packaging was clarified. The application of several different indicators of freshness was described according to different characteristics of food. The application of intelligent packaging was convenient for food quality detection. With the intelligent packaging, the products could be traced, which greatly improved the packaging intelligence and information and promoted the development of food safety detection system. Consumers can easily judge the food availability and thus reduce the occurrence of foodborne diseases and food waste according to the intelligent packaging. The development of intelligent packaging in China is only at the initial stage. It needs the strong support of the country and the untiring efforts of packaging researchers to promote the better development of intelligent packaging in the food field.

KEY WORDS: optical system; food waste; intelligent packaging; food freshness; food quality detection

收稿日期: 2019-07-01

基金项目: 广西大学科研基金(XGZ160294); 2018—2020年广西本科高校特色专业及实验实训基地(中心)建设项目(T305009401); 江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室开放基金(KL201909)

作者简介: 高琳(1995—), 男, 广西大学硕士生, 主攻包装工程。

通信作者: 鲁鹏(1984—), 女, 广西大学副教授、硕导, 主要研究方向为功能包装材料。

食物浪费是粮农组织面临的主要问题之一,食物浪费不仅仅是道德和经济性问题,也消耗了有限的自然环境资源(即水、能源、化学物质和材料)^[1]。在大多数国家,特别是工业化国家,人们对食物浪费的问题越来越重视。尽管从食品生产者到零售商再到消费者都可以在防止和减少食物浪费方面发挥作用,但由于食品在运输和储运过程中某些不良环境常常会加速食品的变质,由此引发的食物浪费问题依然存在。如今,包装已成为保证食物链安全,避免不良反应,满足消费者期望,提高食品货架期的一项重要技术。智能包装作为一种通过实时监测包装食品的环境条件,从而提供食品在流通和储存期间品质信息的技术手段,在减少食品浪费方面具有巨大的潜力^[2]。文中介绍智能包装在食品新鲜度指示方面的应用分类和作用机理,并针对其在果蔬、水产品、肉类等食品领域的研究进展进行综述,为促进智能包装在我国食品新鲜度指示和降低食物浪费领域的发展提供参考。

1 智能包装指示食物新鲜度的现状

智能包装技术是利用某些特殊材料能够实时监测和记录食品的品质信息,从而感知和记录食品的变质情况,集合了多元知识基础的新兴技术^[3]。智能包装技术着重关注微生物、氧气、异味和光线等影响食品品质的外部因素,通过监测及控制外界环境,从而达到实时检测食品品质和减少食品浪费的目的^[4]。随着人民生活水平的提高,人们越来越重视食品安全,食物的变质与否牵动着消费者的神经,因此研究新型的、符合大众对食品要求的包装显得尤为重要^[5]。

目前,采用静态“Best Before”和“Use By”对食品货架期进行标识的方法是食品行业保守使用的一种通用方法^[6]。这种传统标识方法可以方便消费者判断食品的有效保质期,并及时作出相应处理,最大限度地降低物流过程中带来的风险。因为每个食品的包装状态存在一定的差异,同时在储运过程中,由于操作处理不当(例如温度骤变、包装破损等)造成的后果都有可能加速食品的变质,进而严重改变食品的有效保质期,所以一次性的“动态货架期系统”被开发并应用到包装中,以便为消费者提供更真实、有效的食品信息^[7-9]。

根据 EC/50/2009,智能包装系统是可以增强被包装产品在通信和营销方面功能的一种系统,它借助可以察觉包装食品或食品周围环境的智能材料,向消费者动态反馈关于产品当前的质量信息^[10]。目前,在食品包装领域常用的智能包装系统主要包括射频识别标签(RFID)、时间-温度指示器(TTI)、包装完整性传感器(通常是气体传感器)和新鲜度指示器,这类智能包装可以通过内部产品(食物成分和顶部空间中

的代谢物)和外部因素(环境)相互作用,使指示器产生与食品状态相关的反应(即颜色变化、电信号)^[11],所生成的信息不仅可以告知消费者产品的安全性和质量,提高食品在分销链和消费者中的信息传输效率,还可以成为减少食品浪费的有力工具^[12-15]。

在食品新鲜度检测领域,电化学传感器(如电子舌和电子鼻子)具有测试准确等优势,但这类系统很复杂,需要昂贵的仪器,不适合用在包装中^[13]。射频识别(RFID)标签可以应用于食品生产和流通的各个环节,实现防伪及溯源等目的,但是标签本身需要内置射频芯片和射频天线,标签生产和系统维护等整体成本较高^[14]。基于此,在开发易于处理的一次性系统的技术中,显色化学传感器的使用可能是最有希望的技术之一。显色化学传感器通常便宜,用途广泛,既能打印在包装上面,可以使用肉眼来检测透明薄膜的颜色变化,还能通过相机或其他测量图像捕获系统来进行观察。随着视觉成像技术的发展和普及,基于显色化学传感器的可视化智能包装在食品新鲜度检测,降低食品浪费领域具有良好的发展前景^[15]。

2 可视化智能包装的分类和作用机理

食品的新鲜度直接决定了食品的有效货架期和可食用性,食品的生产、包装、储运和销售各个环节中,微生物作用、温度湿度变化及包装内环境改变等因素,都会直接影响食品本身的品质和安全。通过可视化智能包装,可以直接有效地给出食品品质的实时相关信息,方便消费者判断食品的安全性,对减少食品浪费具有重要意义。可视化智能包装主要分为 3 类:新鲜度指示器、时间-温度指示器和包装完整性指示器,典型示例见表 1。

2.1 新鲜度指示器

新鲜度指示器是通过微生物生长或代谢的产物与新鲜食品中产生的代谢物反应来监测包装食品质量的一种技术手段^[14]。研究表明,食品随着贮藏时间的延长,会发生一系列生物或化学变化,产生葡萄糖、有机酸(例如乳酸)、乙醇、二氧化碳、生物胺、挥发性化合物或硫衍生物等物质,而这些物质能够在食物贮藏期间显示微生物的生长,因此提供了将他们作为新鲜度指标的可能性^[16]。

目前,通过检测食品代谢物监测食品新鲜度的智能包装研究有很多,但市场上的商业化产品仍旧比较少见^[14]。Sensor Q™ 是一种基于花青素的 pH 传感技术,其能够检测由微生物导致的肉类腐败所产生的生物胺,见图 1a^[17]。Morsy 等^[18]开发了 Raflatac 比色传感器,用于监测鱼肉的劣化,也适用于家禽,见图 1b。Raflatac 是基于纳米银层的新鲜度指示器,可以与半胱氨酸的分解产物硫化氢反应,指示剂在包装时

表 1 可视化智能包装技术和产品示例
Tab.1 Visual intelligent packaging technology and product example

技术	商品名称	工作原理	供应商
新鲜度指示器	FreshTag®	pH 响应型颜料与鱼肉变质后产生的挥发性氮化合物（氨气、二甲胺，三乙胺等）作用发生颜色变化	COX Recorders, USA
	Freshness Guard Indicator	禽肉变质后产生硫化物与纳米银涂层作用产生颜色变化	UPM Raflatac, Finland
	Toxin Guard®	PE 包装膜表面固定化抗体与致病菌接触后相互作用发生颜色变化	Toxin Alert Inc., Canada
	RipeSense®	颜色指示剂与水果成熟后释放的香气成分相互作用发生颜色变化	RipeSense, New Zealand
时间-温度指示器	3M Monitor Mark™	温度敏感型产品在储运过程中温度的变化引发标签颜色发生不可逆变化	3M company, USA
	Fresh-Check®	食品暴露在高温中后，标签颜色会逐渐变深，指示食品新鲜度	Temptime Corp., USA
	VITSAB®	颜色视窗中包藏 2 种反应物质在按压激活后随时间温度发生酶化反应，视窗颜色逐渐加深	VITSAB International AB, USA
	TopCryo®	基于温度-时间-微生物敏感标签，农产品品质随温度时间变化，标签从绿色变成红色	TOPCRYO, French
包装完整性指示器	Ageless Eye®	包装内氧气浓度升高，颜色指示标签由粉色逐渐变成蓝色	Mitsubishi Gas Chemical Corporation, Japan
	Tell-Tab™	包装破损后，包装内氧气浓度升高，指示标签颜色由粉色逐渐变成蓝色或紫色	IMPAK, Corporation, USA

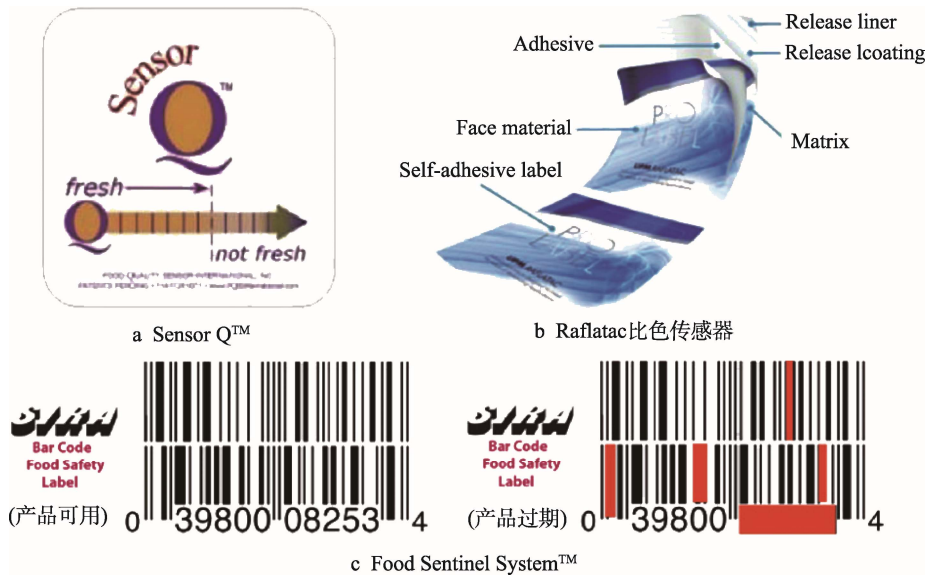


图 1 新鲜度指示器示例
Fig.1 Example of a freshness indicator

是不透明的浅棕色，当硫化银形成时，颜色转变为透明^[19]。FreshTag®是一种比色指示剂，可以检测鱼类产品中挥发性胺的形成^[20]，Toxin Guard™是在抗体的基础上制成塑料薄膜^[21]，可以识别直接接触食品的致病菌是否超标。Food Sentinel System™是一种用于检测食物的生物传感器，其所特有的特殊病原体抗体形成条形码的一部分，而污染细菌的存在导致了局部暗

条的形成，使条形码在扫描时变为不可读^[22]（见图 1c）。

2.2 时间-温度指示器

时间-温度指示器是设计用于连续监测配送链上冷藏和冷冻产品温度的工具。工作原理是时间或温度的变化使指示剂发生相应的物理或化学反应，从而使

指示剂发生不同程度的机械变形或颜色变化^[23]。由于其原理简单,指示器反应不依赖于食品的性质或化学物质的浓度,而是取决于温度的变化,因此TTI成为当今包装中最常用的技术。时间-温度指示器记录了随温度升高而产生的物理(监测标记),化学,酶或微生物变化的过程^[24]。这种系统以简单的信息显示方式向消费者呈现,见图2,包括扩散型标签(图2a)、聚合型标签(图2b)、变色型标签(图2c)。

海产品中致病菌的增殖速度与温度时间的变化密切相关,海产品在储运过程中温度的变化会造成产品品质的剧烈改变。如在厌氧条件下,海鲜中肉毒杆菌在22℃下的增殖速度是4℃下的25~27倍,在15℃下的增殖速度是4℃下的10~12倍(见图2d)。基于此,VITSAB® TTIs标签在激活状态下随着储运过程中温度的变化而发生酶化反应,标签颜色由浅变深从而实现对温度变化的指示,进而间接降低致病菌引发食品安全的危险(见图2e)。OnVu® TTIs标签采用温度时间响应型颜料作为印刷油墨的功能成分,随着环境温度的升高和时间的延长,标签的颜色由深逐渐变浅,并且温度越高,颜色变浅越明显,通过对比参比色卡,可以实时显示食品的有效货架期(见图2f)。

2.3 包装完整性指示器

完整性指示器是能够提供关于包装被打开多长时间或给出内部气体信号的比例信息技术。完整性指示器的使用与气调包装(MAP)有关^[25],因为气调包装通常用其他气体(即二氧化碳或氮气)替代氧来提高产品的货架寿命,所以包装的完整程度直接影响包装环境中二氧化碳或氧气的浓度。完整性指示器商业实例常见的有Ageless Eye(图3a),Tell-Tab(图3b)和CO₂Sense(图3c),提供了不同的颜色变化与

氧气浓度的关系,能够用肉眼检测到氧气浓度低至0.5%的变化。此外,针对气调包装中二氧化碳的浓度变化,采用CO₂响应型颜料,该颜料可以在CO₂浓度变化下由紫色变成黄色,可应用于气调包装完整度的检测中^[26]。

3 可视化智能包装在减少食物浪费中的应用

3.1 果蔬

对应用于果蔬的技术研究表明,智能包装是一种有效的方法,可用于检测腐败过程的非破坏性技术,在腌制蔬菜、新鲜水果和鲜切果蔬等领域都具有较为广泛的应用前景。果蔬类产品在包装后,由于细胞的呼吸作用会产生乙烯、二氧化碳和硫化氢等气体,从而改变包装内环境的气氛。使用可视化的包装材料在包装内环境气氛发生变化后产生肉眼可辨的颜色变化来使消费者了解果蔬的新鲜程度。

如Seok和Wan^[27]开发了几个传感器来监测泡菜的质量,泡菜是韩国最受欢迎的配菜之一。将聚丙烯树脂(用Ca(OH)₂作为CO₂的一种吸附剂)和指示剂(溴甲酚紫和甲基红)复合标记在泡菜的盖子上,由于在泡菜发酵的过程中不同温度下pH值从5.8降至3.5,可滴定酸度从0.25%升高到1.1%,导致指示剂的颜色由蓝色变为浅绿色(溴甲酚紫),从淡橙色变为红色(甲基红),因此可以通过指示剂的颜色变化来监测泡菜产品的成熟度。此外,还可以在尼龙膜上印刷感应油墨,并将所得尼龙层与白色低密度聚乙烯进行层压,以薄层中溴甲酚紫和甲基红作为化学染料的凹印彩色指示器,通过颜色变化指示泡菜的发酵程度^[28]。

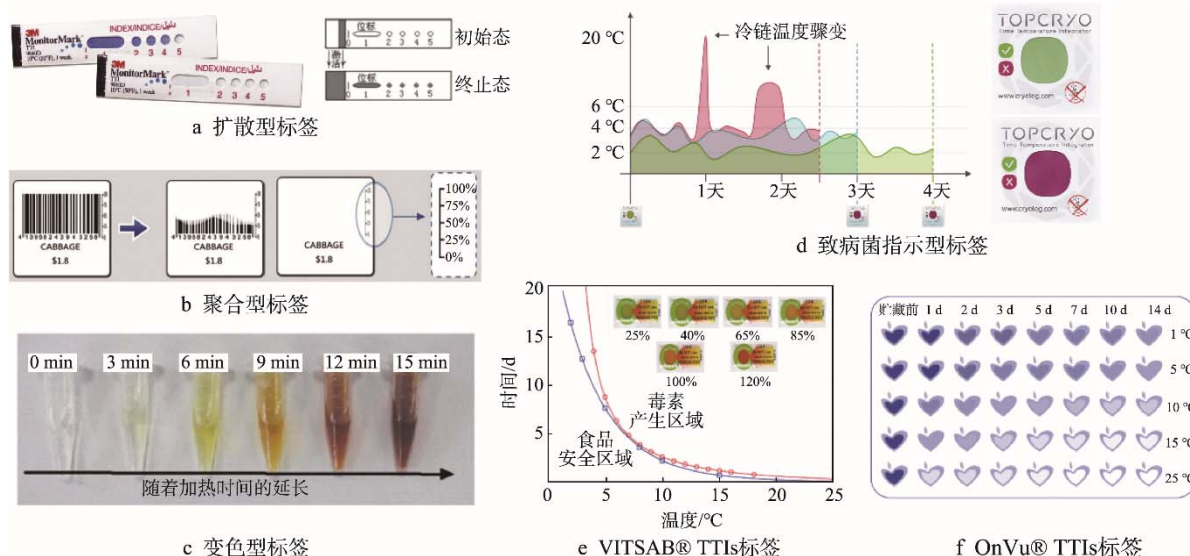


图2 时间-温度指示器示例
Fig.2 Example of a time-temperature indicator

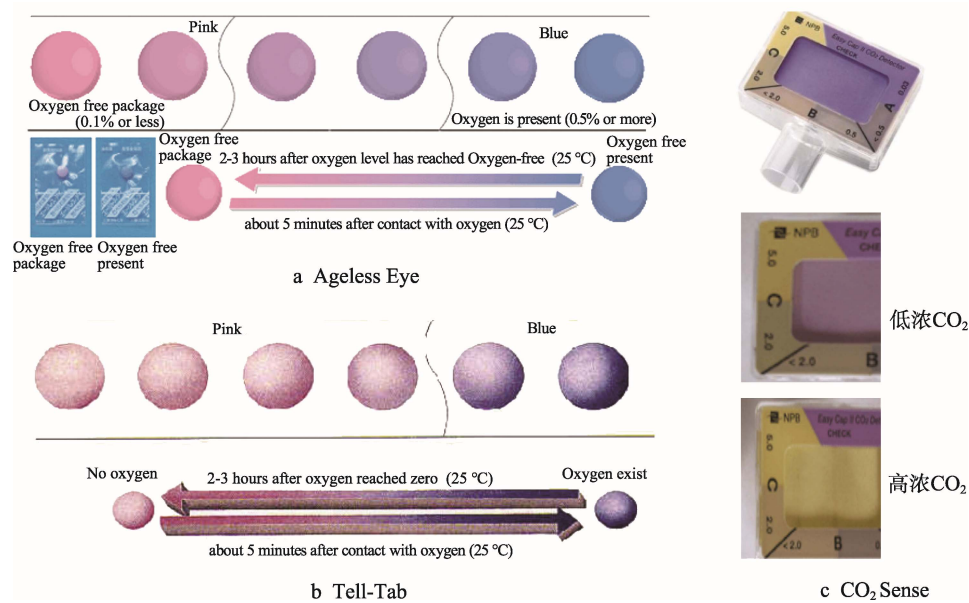


图 3 包装完整性指示器示例
Fig.3 Example of a packaging integrity indicator

2004 年新西兰 P-P Enterprises 超级市场推出了 Ripe Sence™ 洋梨新包装，该标签可通过检测水果成熟后所产生的天然芳香成分来判断其成熟度，见图 4a。当果实坚硬而不成熟时，标签会呈现红色；当水果完全成熟时，标签会由红色变成黄色^[29]。

Kuswandi 等^[30]基于溴酚蓝开发了一个监测番石榴新鲜度的系统。通过吸附将染料固定在纤维素膜上，在不同 pH 值下观察到从蓝色到绿色的变化，如图 4b 所示，该系统可用于测定不同环境条件下的番石榴新鲜度。

Chen 等^[31]开发了一种用于鲜切灯笼椒新鲜度指示的颜色变化型智能指示标签。指示标签以甲基红和

溴甲酚蓝为指示剂，在 7 °C 的贮藏条件下可以发生显著的颜色变化，从而清晰指示食品的新鲜度和可食用性，见图 4c。

Sachdev 等^[32]提出了银基黄色胶体纳米颗粒 (AGY) 在洋葱腐败中释放有机硫化化合物的视觉传感器，通过监测 10 d 标签颜色的变化，发现 AGY 胶体溶液由原始黄色变化为橙色、粉红色直至无色，表明标签对有机硫化化合物有很好的响应。

3.2 水产品

由于渔业的利益，需要迅速发展合适的方法来评估鱼和海鲜产品的实时新鲜度，近年来，一些研究已

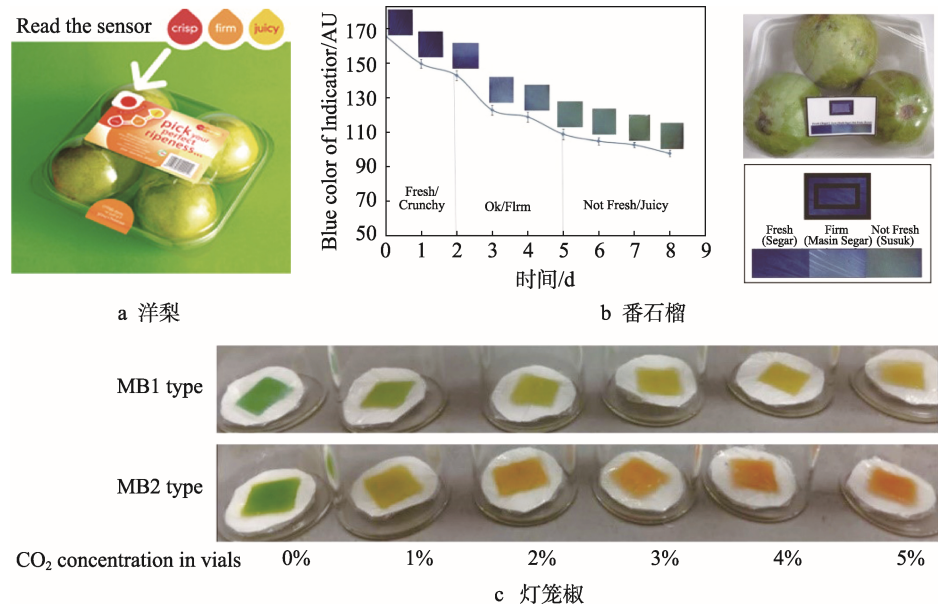


图 4 颜色变化型智能指示标签在果蔬新鲜度中的应用示例
Fig.4 Example of application of color-changing intelligent indicator labels in the freshness of fruits and vegetables

经集中在智能包装的发展上。研究发现,由于鱼类富含丰富的脂肪和蛋白质,在包装贮藏过程中容易受到微生物的影响分解成脂肪酸和少量挥发性氨类物质,可以制备针对微生物或微生物代谢的产物来产生颜色变化的智能包装膜,通过适当的颜色显示型传感器进行检测和识别^[33]。

在这一领域,Pacquit 等^[34]提出了一种快速、灵敏检测鱼体内腐败物质的方法,如图 5a 所示。发现传感器颜色响应与鳕鱼样品中的细菌生长模式相关,实验通过在聚合物基质中包封一种 pH 值敏感的染料(溴-甲酚绿)制备智能指示标签,通过标签从黄色到蓝色的颜色变化来对挥发性化合物进行识别,进而能够实时监测肉质的腐败程度。

Kuswandi 等^[35]使用一种 PANI 膜的化学传感器,如图 5b 所示,用于实时监测包装鱼 PANI 膜的顶部空间中微生物分解产物。在鱼腐烂期间,通过颜色变化(从绿色到蓝色),可以得到各种碱性挥发性胺的释放量,从而指示鱼类的新鲜程度。通过对虱目鱼样品的实验证实,PANI 膜的响应也与鱼类样品中的微生物生长模式息息相关。

Zaragoza 等^[36]以二氧化硅和氧化铝为载体,负载 pH 响应型指示剂、路易斯酸和氧化还原指示剂的混合物(异吩恶唑酮、溴甲酚紫、溴酚蓝、酚红及一种双核铈络合物),制备了针对海鲷鱼肉腐败检测的颜色变化型传感器阵列,检测鱼肉冷藏 2, 4, 7, 9, 11 d 的新鲜度,见图 5c。

Sun 等^[37]开发了通过在指示剂溶液中加入有机酸或碱来提高 pH 值指示剂溴酚蓝的灵敏度方法,并借助传感器检测 $C_2H_8N_2$ 和 HCl 气体,验证了指示剂在 pH 值调节后的灵敏度有所提高。此外,还建立了 2 种指示剂(甲酚红和甲苯胺黄)的色度传感器阵列,将各自的原色和 pH 值调整到颜色过渡点形式,以确定鲭鱼的新鲜度,通过检测从腐烂的鱼肉中释放出来的挥发性有机化合物(VOCs)反映食物的新鲜度。

Zhai 等^[38]以聚乙烯醇、蔷薇花萼提取物和花青素(RACNs)的混合物作为成膜液,采用溶液浇铸法制备比色膜,用于监测在 4 °C 贮藏条件下鲢鱼的新鲜度,建立指示标签颜色变化与鱼肉腐败产生挥发性盐基氮直接的关系,从而间接评价鱼肉的新鲜度,见图 5d。

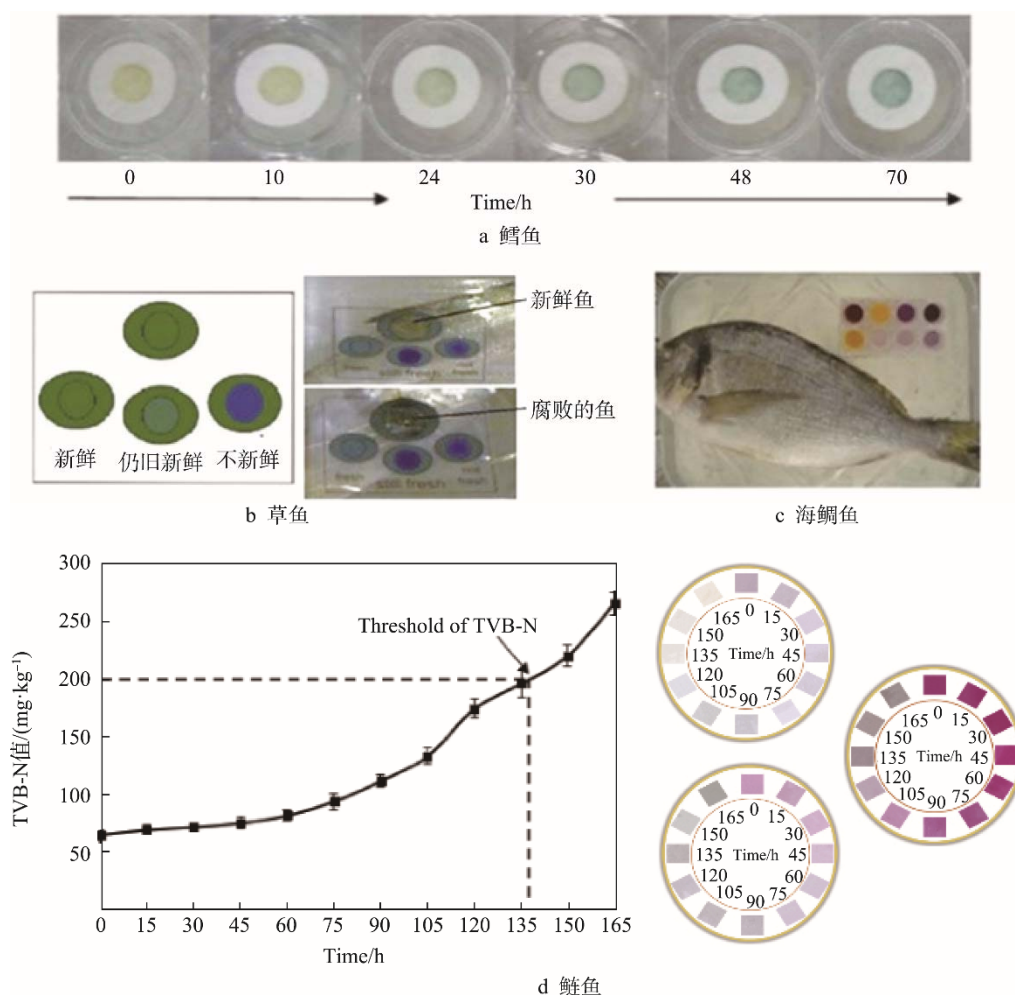


图 5 颜色变化型智能指示标签在鱼肉新鲜度中的应用示例

Fig.5 Example of application of color-changing intelligent indicator labels in fish freshness

3.3 肉类

肉类产品是人类所需的蛋白质、氨基酸、脂肪等营养物质的重要来源，是人们膳食的重要组成部分，肉类食品在贮藏和运输环节中，容易受脂肪、蛋白质的氧化及细菌污染等因素而腐败变质。肉类新鲜度实时检测的需求日益增加，鸡肉、猪肉及牛肉等主要肉类产品可视化新鲜度智能包装的相关研究发展迅速^[39]。由于肉类容易受脂肪、蛋白质的氧化及细菌污染而产生脂肪酸、硫化氢、氨及二氧化碳，对于不同的肉类产品可以通过对肉类腐败代谢物的检测来确

定产品的新鲜程度。

如 Rukchon 等^[40]开发了一种基于混合 pH 染料的薄膜通过指标，用于监测有氧和 MAP 条件下冷藏过程中去皮鸡胸的腐败情况，CO₂ 被用作与微生物相关的腐败代谢物，见图 6a。该智能包装指示剂中含有 2 组 pH 敏感染料，一组是溴百里酚蓝和甲基红的混合物，另一组是溴百里酚蓝、溴百里酚绿和酚红的混合物。通过研究 2 组指示剂的特性，以及它们对 CO₂ 的响应，发现去皮鸡胸颜色的变化与 CO₂ 的含量以及微生物生长模式的水平有很好的相关性。

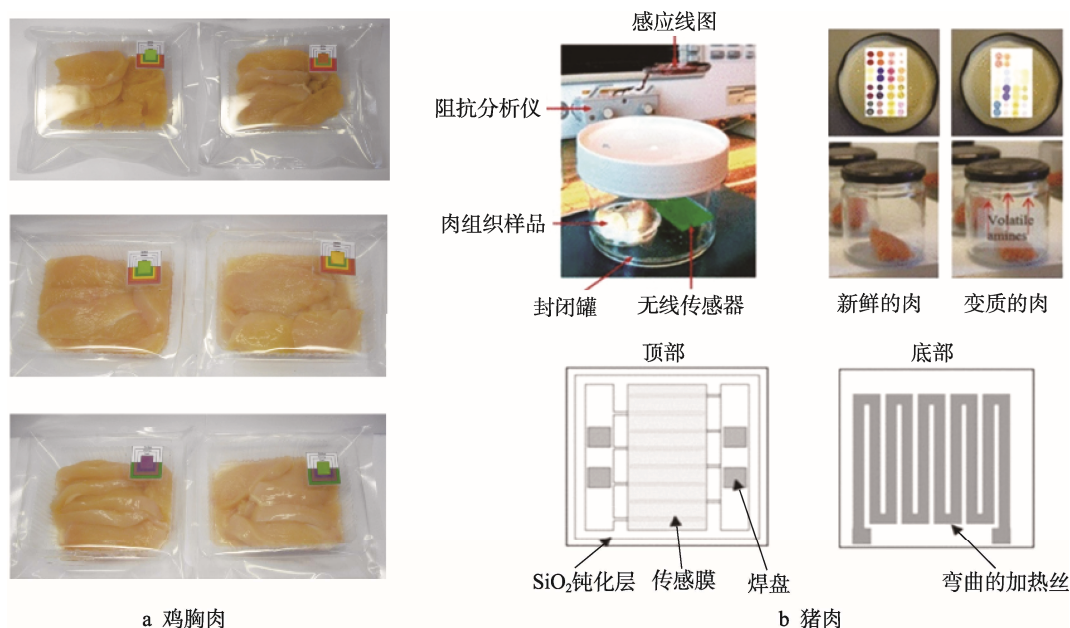


图 6 颜色变化型智能指示标签在禽肉新鲜度中的应用示例

Fig.6 Example of application of color-changing intelligent indicator labels in poultry freshness

在猪肉样本中，通过研究 Chen^[41]和 Li^[42]论述发表的 2 项监测猪肉新鲜度的方法。提出了一个传感器阵列，该传感器阵列是通过在硅胶平板上打印 12 种化学反应性染料（3 个 pH 值指标和 9 个金属卟啉）来制造，见图 6b。通过对比曝光前后不同的图像，发现染料的颜色变化与腐败代谢物存在有关。在数据分析的分类模型和参数优化方面研究结果存在差异，研究认为该方法在评价猪肉新鲜度方面有很大的潜力。

Huang 等^[43]利用 4 种天然色素（从菠菜、胡萝卜、冬令茉莉、黑米中提取）阵列，开发了一种用于猪肉新鲜度评估的光电鼻子。阵列颜色变化与每克猪肉总存活数(TVC)和生物胺的含量直接相关。

Kuswandi 等^[44]构建了一个更简单、更直接的传感器，用于检测传统覆盖塑料薄膜的气氛中聚乙烯托盘包装的牛肉新鲜度。该传感器以石蕊为颜色指示剂，基于当石蕊试纸与包裹内的大气接触时试纸的颜色变化，即从红色到蓝色（pH 值 5.7~6.0），从而监

测牛肉新鲜度。研究发现，这种 pH 值的变化是由包装鲜肉的微生物生长所引起的生物胺浓度驱动。

4 结语

食品新鲜度智能包装是对传统“最佳使用期”和“有效期限”指示食品新鲜度方法的一个重大变革，可以针对每一个包装提供有关食品状态的实时信息，避免安全食品因为已经过期而被丢弃，所以食品新鲜度智能包装是世界范围内为有效减少食物浪费领域的一个非常重要的新兴市场。

尽管目前关于新鲜度指示标签、时间-温度指示标签和包装完整性指示标签的研究都正逐步走向商业化，但是设计开发更先进智能、绿色环保的包装标签依旧势在必行。例如，借助柔性电子印刷技术将可视化智能传感器与现有包装材料相结合，制备重量轻、方便携带和可折叠的智能包装，既符合通过传感器将数据传输到互联网或智能手机的趋势，又大大降

低成本。结合先进的纳米技术,可以为多学科研究团队提供众多新兴机会。此外,目前大多数新鲜度智能包装系统都是专为肉和鱼以及果蔬的腐败而设计,很少有关于谷物、奶制品、坚果等的研究,这是未来几年研究拓展的新领域。

面对未来的挑战,可以通过研发更加智能的包装来建立一个更可持续的社会,从而减少食物浪费。智能包装能够实时告知食物的真实状态,在保持食品安全的同时减少食品损失,随着技术的进步和市场需求的不断增长,智能包装对食品行业的影响将会越来越广泛。

参考文献:

- [1] DURET S, HOANG H M, DERENS-Bertheau E, et al. Combining Quantitative Risk Assessment of Human Health, Food Waste, and Energy Consumption: The Next Step in the Development of the Food Cold Chain[J]. *Risk Analysis*, 2018, 39(4): 906—925.
- [2] 郭鹏飞, 何昊葳, 付亚波, 等. 气敏类智能包装标签技术的研究进展[J]. *包装工程*, 2018, 39(11): 13—18.
GUO Peng-fei, HE Hao-wei, FU Ya-bo, et al. Research Progress of Gas Sensitive Smart Packaging Labels[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(11): 13—18.
- [3] 崇岚, 潘军辉, 熊鹏文. 智能包装技术的应用现状和发展前景[J]. *包装工程*, 2017, 38(15): 159—164.
CHONG Lan, PAN Jun-hui, XIONG Peng-wen. Development and Applications of Intelligent Packaging Technology[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(15): 159—164.
- [4] DOBRUCKA R, CIERPISZEWSKI R. Active And Intelligent Packaging Food-Research And Development-a Review[J]. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2014, 64(1): 7—15.
- [5] 侯晓阳. 新型食品包装材料的发展概况及趋势[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(24): 6400—6405.
HOU Xiao-yang. Development and Tendency of Novel Food Packaging Materials[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 9(24): 6400—6405.
- [6] POYATOSRACIONERO E, ROSLIS J V, JOSÉLUIS V, et al. Recent Advances on Intelligent Packaging as Tools to Reduce Food Waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 3398—3409.
- [7] MERKX D W H, HONG G T S, ERMACORA A, et al. Rapid Quantitative Profiling of Lipid Oxidation Products in a Food Emulsion by ¹H NMR[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(7): 4863—4870.
- [8] ZIMET P, MOMBRÚ, ÁLVARO W, et al. Optimization and Characterization of Nisin-Loaded Alginate-chitosan Nanoparticles with Antimicrobial Activity in Lean Beef[J]. *LWT*, 2018, 91: 107—116.
- [9] GORANSSON M, NILSSON F, JEVINGER A. Temperature Performance and Food Shelf-life Accuracy in Cold Food Supply Chains-Insights from Multiple Field Studies[J]. *Food Control*, 2018, 86: 332—341.
- [10] JIA Wei-han, LUIS R G, QIAN Jian-ping, et al. Food Packaging: a Comprehensive Review and Future Trends[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2018, 17(1): 860—877.
- [11] 李洋, 冯刚, 王磊明, 等. 新鲜度指示型智能包装的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(4): 293—299.
LI Yang, FENG Gang, WANG Lei-ming, et al. Freshness Indicator Intelligent Packaging[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(4): 293—299.
- [12] DILIDAER Y, CHENGYING W, ANDREW M. Evaluation of an 'After Opening Freshness (AOF)', Label, for Packaged Ham[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 17: 107—113.
- [13] SOPHIE B, AURELIAN J H, FRANCOIS X G, et al. Highly-Selective Optoelectronic Nose Based on Surface Plasmon Resonance Imaging for Sensing Volatile Organic Compounds[J]. *Analytical Chemistry*, 2018, 90(16): 9879—9887.
- [14] REALINI C E, MARCOS B. Active and Intelligent Packaging Systems for a Modern Society[J]. *Meat Science*, 2014, 98(3): 404—419.
- [15] KAUR S, HWANG H, LEE J T, et al. Displacement-based, Chromogenic Calix Pyrrole-indicator Complex for Selective Sensing of Pyrophosphate Anion[J]. *Tetrahedron Letters*, 2013, 54(29): 3744—3747.
- [16] ARVANITOYANNIS I S, STRATAKOS A C. Application of Modified Atmosphere Packaging and Active/Smart Technologies to Red Meat and Poultry: a Review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(5): 1423—1446.
- [17] GUILLERMO F, ISMAEL S, CARRASCO R, et al. Intelligent Packaging Systems: Sensors and Nanosensors to Monitor Food Quality and Safety[J]. *Journal of Sensors*, 2016: 1—8.
- [18] MORSY M K, ZÓR, KINGA, KOSTESHA N, et al. Development and Validation of a Colorimetric Sensor Array for Fish Spoilage Monitoring[J]. *Food Control*, 2015, 60: 346—352.
- [19] SMOLANDER M, KERRY J, BUTLER P. Smart Packaging Technologies for Fast Moving[M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2008: 55—58.
- [20] KERRY J P. Chapter 23-New Packaging Technologies, Materials and Formats for Fast-moving Consumer Products[M]. *Innovations in Food Packaging*. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2014: 549—584.
- [21] YAM K L, TAKHISTOV P T, MILTZ J. Concepts and Applications[J]. *Intelligent Packaging*, 2005, 70(1): 1—10.
- [22] GOLDSMITH R M, GOLDSMITH C, WOODAMAN J G, et al. Development of Color Indicators for Kimchi Packaging[J]. *Food Science*, 1999, 64(2): 255—257.
- [23] 万正刚, 陈蕴智, 张正健. 时间-温度指示器在疫苗

- 运输包装中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 100—102.
- WAN Zheng-gang, CHEN Yun-zhi, ZHANG Zheng-jian. Application of Time-temperature Indicators in the Transport Packaging of Vaccines[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 100—102.
- [24] 王志伟. 智能包装技术及应用[J]. 包装学报, 2018, 10(1): 27—33.
- WANG Zhi-wei. Intelligent Packaging Technology and Application[J]. Packaging Journal, 2018, 10(1): 27—33.
- [25] HEMPEL A W, O'SULLIVAN M G, PAPKOVSKY D B, et al. Use of Smart Packaging Technologies for Monitoring and Extending The Shelf-Life Quality of Modified Atmosphere Packaged (MAP) Bread: Application of Intelligent Oxygen Sensors and Active Ethanol Emitters[J]. European Food Research and Technology, 2013, 237(2): 117—124.
- [26] EHSAN M, LEOREY M. Intelligent Packaging in Meat Industry: An Overview of Existing Solutions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(7): 3947—3964.
- [27] SEOK I H, WAN S P. Development of Color Indicators for Kimchi Packaging[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(2): 3—7.
- [28] SEOK I H. Gravure-printed Colour Indicators for Monitoring Kimchi Fermentation as A Novel Intelligent Packaging[J]. Packaging Technology & Science, 2010, 15(3): 155—160.
- [29] 许文才, 付亚波, 李东立, 等. 食品活性包装与智能标签的研究及应用进展[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 1—10.
- XU Weng-Cai, FU Ya-Bo, LI Dong-Li, et al. Research and Application Progress of Food Active Packaging and Smart Labels[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 1—10.
- [30] KUSWANDI B, MARYSKA C, JAYUS A A, et al. Real Time On-package Freshness Indicator for Guavas Packaging[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2013, 7(1): 29—39.
- [31] CHEN Zhi-hui, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Applicability of a Colorimetric Indicator Label for Monitoring Freshness of Fresh-cut Green Bell Pepper[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 140: 85—92.
- [32] SACHDEV D, KUMAR V, MAHESHWARI P H. Silver Based Nanomaterial, as A Selective Colorimetric Sensor for Visual Detection of Post Harvest Spoilage in Onion[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 228: 471—479.
- [33] 蒋海云, 曾慧, 张诗浩, 等. 食品新鲜度指示器的研究与发展趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12): 3027—3033.
- JIANG Hai-Yun, ZENG Hui, ZHANG Shi-Hao, et al. Research and Development Trend of Food Freshness Indicator[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(12): 3027—3033.
- [34] PACQUIT A, FRISBY J, DIAMOND D, et al. Development of A Smart Packaging for The Monitoring of Fish Spoilage[J]. Food Chemistry, 2007, 102(2): 466—470.
- [35] KUSWANDI B, JAYUS, RESTYANA A, et al. A Novel Colorimetric Food Package Label for Fish Spoilage Based on Polyaniline Film[J]. Food Control, 2012, 25(1): 184—189.
- [36] ZARAGOZ A P, FUENTES A, FERNANDEZ S I, et al. Evaluation of Sea Bream (*Sparus Aurata*) Shelf Life Using An Optoelectronic Nose[J]. Food Chem, 2013, 138(2): 1374—1380.
- [37] SUN Wen, LI Hui, WANG Han, et al. Sensitivity Enhancement of Ph Indicator and Its Application in The Evaluation of Fish Freshness[J]. Talanta, 2015, 143: 127—131.
- [38] ZHAI X, SHI J, ZOU X, et al. Novel Colorimetric Films Based on Starch/Polyvinyl Alcohol Incorporated with Roselle Anthocyanins for Fish Freshness Monitoring[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 308—317.
- [39] ISHFAQ A, HONG L, LONG Z, et al. An Overview of Smart Packaging Technologies for Monitoring Safety and Quality of Meat and Meat Products[J]. Packaging Technology and Science, 2018, 31(7): 449—471.
- [40] 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.
- [41] CHEN Q, HU W, SU J, et al. Nondestructively Sensing of Total Viable Count (TVC) in Chicken Using an Artificial Olfaction System Based Colorimetric Sensor Array[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 168: 259—266.
- [42] LI H, CHEN Q, ZHAO J, et al. Non-destructive Evaluation of Pork Freshness Using a Portable Electronic Nose (E-Nose) Based on a Colorimetric Sensor Array[J]. Analytical Methods, 2014, 6(16): 62—71.
- [43] HUANG X, ZOU X, ZHAO J, et al. Sensing The Quality Parameters of Chinese Traditional Yao-Meat By Using a Colorimetric Sensor Combined with Genetic Algorithm Partial Least Squares Regression[J]. Meat Science, 2014, 98(2): 203—210.
- [44] KUSWANDI B, NURFAWAIDI A. On-package Dual Sensors Label Based on pH Indicators for Real-time Monitoring of Beef Freshness[J]. Food Control, 2017, 82: 91—100.