冷鲜肉新鲜度指示标签的研究及应用进展

王芳[a]，陈满儒[a]，赵郁聪[a]，丁勇[b]
（陕西科技大学 a.轻工科学与工程学院 b.食品与生物工程学院，西安 710021）

摘要：目的 探究新鲜度指示标签在冷鲜肉包装领域的研究现状及应用进展，为新鲜度指示包装的应用提供理论基础。**方法** 介绍新鲜度指示标签的定义和功能，并根据生鲜肉类腐败过程中产生的不同特征反应物进行分类，阐述不同类型指示标签的工作原理。探究新鲜度指示智能标签在国内外的研究现状及应用，并分析制约智能指示标签发展的因素。**结论** 新鲜度指示标签在一定程度上代表着智能标签的发展程度，是食品包装未来发展的研究热点和方向之一；由于成本高、制作工艺复杂等因素的影响，国内还没有达到商业化程度，还需从技术角度继续深入研究，以开发出低成本、高精度的新鲜度指示标签，进而推动智能标签的商业化应用。

关键词：冷鲜肉；新鲜度；智能标签
中图分类号：TB484 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2020)05-0083-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.05.011

Progress in Study and Application of Chilled Meat Freshness Indicator

WANG Fang[a], *CHEN Man-ru*[a], *ZHAO Yu-cong*[a], *DING Yong*[b]
(a.College of Bioresources Chemical and Materials Engineering b.School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore the research status and application progress of freshness indicator labels in chilled meat packaging, and to provide a theoretical basis for application of freshness indicator packaging. The definition and function of the freshness indicator label are introduced. The fresh meat is classified based on the different characteristic reactants generated during corruption. The working principle of different types of indicator labels is explained. The research status and application of the freshness indicator smart label at home and abroad are explored; and the factors restricting the development of the intelligent indicator label are analyzed. The freshness indicator label represents the development degree of smart label to a certain extent. It is one of the research hotspots and areas for future development of food packaging. However, due to high cost and complex manufacturing process, its domestic level has not yet reached commercial height. It is necessary to further research and develop low-cost, high-precision fresh indicator labels from a technical perspective to promote the commercialization of smart labels.

KEY WORDS: fresh meat; freshness; smart label

“民以食为天，食以安为先”。食品的新鲜度是影响食品质量和安全的重要因素之一，总体上可以衡量产品安全性的可靠程度[1—2]。肉类食物是人们最喜爱的食物之一，同时含有丰富的优质蛋白质[3—4]。生鲜

收稿日期：2019-06-10
基金项目：陕西省咸阳市科技计划（2017k02-24）
作者简介：王芳（1995—），女，陕西科技大学硕士生，主攻食品包装。
通信作者：赵郁聪（1975—），女，陕西科技大学副教授，主要研究方向为食品包装材料与智能包装技术。

肉类在日常的流通环境中，会受到微生物污染、脂肪氧化酸败、肌红蛋白变色的影响，导致肉类食品极易发生腐坏现象[5—6]，进而使产品丧失食用价值和商业价值。购入食物时，消费者通常根据食品包装上的有效期来判定食品的新鲜度，进而判断是否可以安全食用。这种普遍使用的方法没有考虑到商品在储运过程中由于环境改变造成的质量变化，不能准确判断产品的新鲜程度以及安全性。针对食品的新鲜度指示标签虽然满足了消费者的食品安全监测需求，但由于技术条件等多方面因素的影响，未在国内市场普及。文中拟综述以冷鲜肉食品为对象的新鲜度指示标签的研究现状，为新鲜度指示标签的开发与应用提供借鉴与参考。

1　新鲜度指示标签

1.1　概念

新鲜度指示标签是一种可视化的智能标签，可表征食物的新鲜度，并向消费者提供食物新鲜度的直观信息[7—9]。智能标签于 20 世纪 90 年代兴起，随着市场的扩大和商品种类的极大丰富，被广泛应用于包装、销售等领域。智能标签技术同样可应用于物联网，作为互联网从人到物的延伸，物联网利用智能电子标签实现了信息采集和监控。由于有源电子标签无法满足物联网的所有需求，因此，新一代的交互式智能电子标签 I-RFID 应运而生。功能不同的智能标签适应于各种复杂的应用场景，见表 1，列举了智能指示标签部分类型及应用领域。

根据标签的应用部位和特殊功能具体可分为 3 类[10]，见图 1。第 1 类是贴于包装外部的外部标签，用于检测包装外部环境，如物理冲击指示标签和时间-温度指示器（TTI）；第 2 类是位于包装内部或者与密封件连接的内部指示标签，其主要功能是反应和监测包装内部环境变化，如新鲜度指示标签和包装完整性指示标签；第 3 类是信息型标签，可以改善信息流并促进产品和消费者进行有效沟通，如特殊条形码，可以保存食品信息，实现产品可追溯性等。

1.2　工作原理介绍

通过某种特定的方式，新鲜度指示标签可以对由于微生物进行生长和新陈代谢导致新鲜食品发生的变化作出响应，用以监测包装食品的质量。与反映产

表 1　智能标签类型

Tab.1 Types of smart labels

类型	功能	应用领域	商业应用
时间-温度指示标签	显示时间和温度的累积效果	多用于食品包装	Monitor Mark™
包装完整性指示器	指示气调包装的完整性	食品包装	O_2 Sense TM (Freshpoint Lab，USA)
新鲜度指示标签	实时监测新鲜度	食品包装	Fresh Tag (COX Technologies)
RFID 标签	目标识别、物品跟踪和信息采集等功能	物联网	Temptrip (Temptrip LLC)
防倾倒标签	指示货物的倾倒情况	运输包装	

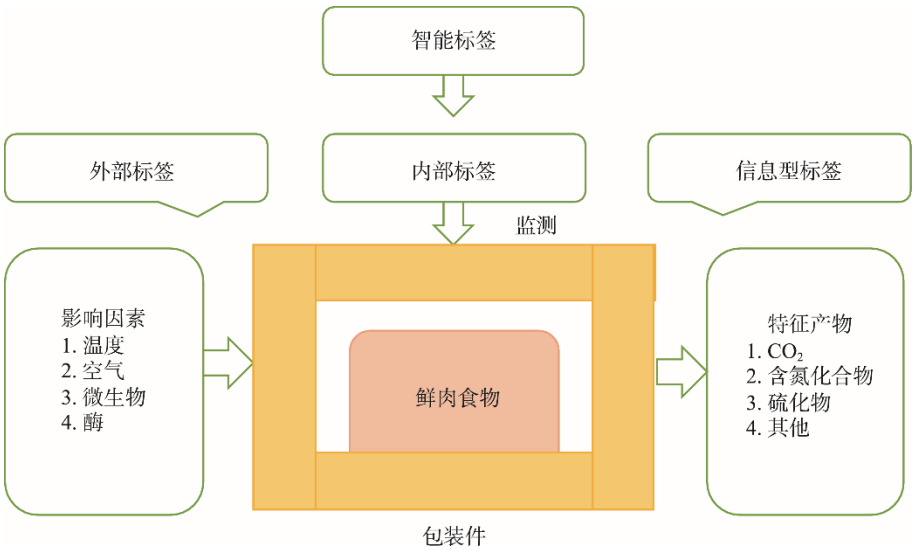

图 1　智能标签概念示意

Fig.1 Schematic of smart label concepts

品的包装完整性和时间-温度历史记录的标签不同，新鲜度指示标签直接表明产品的质量。在结构上，新鲜度指示标签主要由新鲜度指示剂和基质材料构成。新鲜度指示剂这一概念并不是最近才出现，早在 20 世纪 40 年代，Clark[11]就提交了一项专利申请，描述了食品新鲜度指示剂的概念，即“当细菌出现明显增殖后，在视觉上表现出不可逆转的变化”。基质材料作为指示剂的载体及反应场所，可以增加反应灵敏性、拓展标签功能，如在基质材料中添加壳聚糖可增加抑菌性。

通过微生物生长代谢特征产物与指示剂间的不可逆显色反应，新鲜度指示标签呈现出肉眼可视的颜色变化，从而提供产品的质量信息[12—13]。生鲜肉类含有丰富的营养成分，如蛋白质、脂肪、糖类、维生素、有机酸等，pH 值为 5.7~6.5，自由水含量高。如图 1 所示，由于温度、O_2 等影响，为微生物的生长繁殖创造了极为有利的条件，导致生鲜肉类品质降低，产生 TVB-N、CO_2、硫化物等代谢产物[14—15]。根据食物辨别新鲜程度的难易程度和本身价值，相比于蔬菜水果，消费者更容易接受以肉类食品为对象的新鲜度指示标签。

目前肉类食品的新鲜度检测技术主要有近红外光谱、高光谱成像等方法[16—18]，由于操作条件和时间、成本等因素的制约，几乎都被应用于各大高校及检测机构，并不适用于销售环节中的快速检测。由此可见，开发快速、操作简单、无损检测的新鲜度指示标签，有利于经销商和消费者对产品安全的把控。目前已经研究发现了能与特征产物发生显色反应的多种新鲜度指示剂，见表 2。

在一些发达国家，一些食品新鲜度指示包装已被投入市场。美国 COX Technologies 推出了 Fresh Tag[19]，用于监测海鲜中的物质分解。该标签与蛋白质产品腐烂释放的混合气体反应，随着 Fresh Tag 与气体接触，其颜色逐渐从黄色变为深蓝色。虽然国内在智能包装方面起步较晚，智能标签基本没有在市场流通，但近几年智能包装和智能标签成为了研究热点，也取得了一定成果。2013 年，孙媛媛等[20]将质量分数为 0.5%的溴甲酚紫溶液作为染色溶液，制备了一种含有质量分数为 0.7%的羟丙基甲基纤维素的气敏薄膜指示卡，指示卡的颜色由黄变绿，最终变为蓝色，展现猪肉腐败变质的过程；研究还表明，指示卡的颜色变化不受猪肉量的影响。2019 年，邹小波等[21]将结冷胶和桑葚花青素作为内层膜用于指示食品新鲜度，壳聚糖-聚乙烯醇会形成致密隔氧的外层保护膜，通过逐层组装制备食品新鲜度指示膜，在 4 ℃贮藏环境下于三文鱼新鲜度的可视化检测。

2　新鲜度指示标签的类型

新鲜度指示标签可以直接反映由关物理化学变化或微生物繁殖导致的包装食品新鲜度损失信息[22]。腐败过程中，新鲜度指示标签颜色的深浅会随着指示剂和微生物代谢产物发生反应以及反应程度的变化而改变。根据代谢产物不同，鲜肉新鲜度指示标签可分为含氮化合物灵敏型、CO_2 灵敏型和硫化物敏感型等。

2.1　含氮化合物敏感型指示标签

在鲜肉腐坏过程中，在酶和细菌的作用下，蛋白质逐渐分解产生三甲胺（TMA）、二甲胺（DMA）和氨（NH_3）等胺类物质，其具有挥发性，统称为挥发性含氮化合物[23]。由此，可通过智能指示标签对含氮化合物的特异性进行识别，表征肉类新鲜度信息。挥发性盐基氮（Total Volatile Basic Nitrogen，TVB-N）被认为是评估肉类包括海产品腐败的主要指标，其含量越高，表明破坏的氨基酸越多，营养价值受到的影响越严重。TVB-N 由三甲胺（TMA）、二甲胺（DMA）和氨（NH_3）等挥发性含氮化合物组成[24]。目前挥发性盐基氮（TVB-N）值是国标中用以评价肉质鲜度的唯一理化指标。GB2707—2016《食品安全国家标准鲜（冻）畜、禽产品》[25]中根据 TVB-N 浓度不同，将肉类划分为 3 类，分别是一级鲜肉、二级鲜肉和腐败肉。欧盟标准（EC）No2074/2005[26]也将 TVB-N 作为判断鱼肉腐败的指标，规定如果感官方法影响海鲜新鲜度的判别，则应使用 TVB-N 水平标准判断。

2.1.1　基于化学指示剂

国内外已经提出了针对挥发性含氮化合物的许多新鲜度指示剂。其中使用最广泛的显色原理是食物腐败期间包装内产生 TVB-N，一般呈碱性导致 pH 值升高，使 pH 指示剂产生颜色变化。

表 2　可用于检测新鲜度的代谢特征物和指示剂

Tab.2 Metabolites and indicators available for freshness detection

代谢特征物	品类	显色原理	指示剂
挥发性含氮化合物	海鲜、猪肉	基于 pH 敏感染料	溴甲酚绿，酚红等
二氧化碳	多用于气调包装	基于 pH 敏感染料	溴甲酚绿、酚红等
硫化物	家禽、海鲜	基于肌红蛋白、纳米银等的显色反应	肌红蛋白、纳米银等

Kuswandi 等[27—28]开发了基于石蕊和甲基红的新鲜度指示试纸，分别用于实时监控牛肉和鸡块的新鲜度，该标签结构简单、成本低。利用相似原理，王冰雪等[29]以质量分数为 0.5%的溴甲酚紫为 pH 显色剂，定性滤纸为载体，制备出了用以监测猪肉新鲜度的指示卡。指示剂的使用并不局限于单一指示剂，在使用单一指示剂的基础上，Kuswandi 等[30]研究了基于 2 种 pH 指示剂的双指示剂标签，用于监测牛肉新鲜度。使用的 2 种 pH 指示剂是甲基红（MR）和溴甲酚紫（BCP）。通过双色指示剂可以更清楚且容易地检测到牛肉的腐烂，其中 MR 从红色变为黄色，而 BCP 从黄色变为紫色，见图 2。虽然就其 pH 值的变化而言，所制标签判断牛肉新鲜度是准确的，但由于室内环境变化和冷藏室温度变化，所制标签的监控准确度下降。

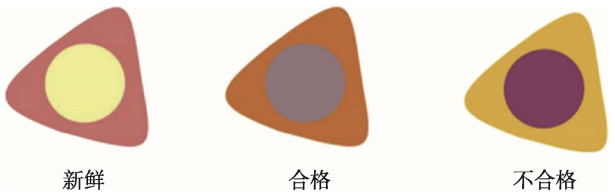

图 2　牛肉新鲜度的双指示剂标签设计

Fig.2 Design of dual indicators label for beef freshness

在食品安全方面，由于标签直接与食物接触，存在物质迁移风险，与新鲜度指示标签的目的相冲突，因此降低迁移风险，开发安全无毒的指示标签是非常有必要的。普遍采用的方法是将 pH 敏感染料固定在基质材料上，降低物质迁移风险。Dowan 等[31]制备了以质量分数为 3%的溴甲酚紫溶液为指示剂的指示标签，为了防止染料与鸡胸肉直接接触并改善其颜色变化敏感性，指示标签设计为具有超吸收层的 3 层结构，利用聚乙烯醇和高吸收性材料将染料固定，见图 3。在此过程中，指示剂的颜色由黄变蓝，最终变为紫色，表明了鸡肉腐败变质过程。同时所制标签显示出对鸡胸肉表面的 pH 变化良好的响应,未观察到染料从指示剂迁移到食物表面。

2.1.2　基于天然提取物指示剂

基于环境 pH 改变这一条件，也可以利用天然提取物作为 pH 敏感染料开发新鲜度指示剂。例如，姜黄素天然染料可用于检测 TVB-N 的产生，从而制备实时监测虾类腐败的包装标签[32]。基于蓝莓花青素，可制作蓝莓新鲜度指示剂，并应用于蓝莓包装，用以指示实际运输过程中蓝莓新鲜度的变化情况[33]。同样利用天然提取物并不局限于单一种类，可尝试不同来源获取天然染料，例如从玫瑰花和甘蓝中提取天然染料，固定在滤纸上作为载体，用于制备智能包装的比色传感器，其颜色随着 pH 值的增加而从红色变为绿色[34]。李琛等[35]制备了基于多种花色苷的鱼肉新鲜度指示标签，如紫薯、杜鹃花瓣、凤仙花瓣等多种色素。

此外，多数天然提取物的稳定性容易受到温度、O_2 等因素的影响。例如花青素具有高活性，稳定性会受到多种因素影响，如温度、pH、O_2、光照、金属离子等因素，因此其应用范围受到了限制。可以改变基质材料，增加其稳定性和分散均匀性。壳聚糖与花青素混合的智能薄膜，可用于基于 pH 变化的食品腐败检测[36]。利用琼脂淀粉与紫薯花青素可以制备实现猪肉品质可视化的智能包装膜[37]。有研究发现纳米多孔结构可以改善其稳定性和均匀性[38]，可应用于基于天然提取物的新鲜度指示标签，如基于细菌纤维素纳米纤维和红甘蓝花青素的 pH 指示包装；同时也有研究表明稀释的花青素对细菌纤维素的形态和结构特性没有影响，可用作食品的视觉智能包装[39]。

虽然由天然来源制备的指示剂可制备无毒指示标签[40]，成功实现了对食品质量的实时监测，但目前商业使用的新鲜度指示标签多使用化学指示剂，使用天然提取物作为指示剂的商业案例还很少。此外，利用天然提取物作为指示剂的大多数研究目标是一次性使用的指示标签，主要是基于新鲜度指示剂不可逆的显色反应。有研究人员开发了一种基于聚苯胺的可再生指示薄膜[41]，可用于检测罗非鱼的新鲜度，也有助于降低成本和环境保护。

2.2　二氧化碳敏感型指示标签

在储存期间，肉类腐败过程中产生的 CO_2 可用于评估质量变化[42]。一般 CO_2 灵敏型包装多用于水果或乳制品及发酵类产品中，CO_2 含量的增加表明食品新鲜度降低。在某些鲜肉食品中，微生物代谢产生的 CO_2 大于挥发性含氮化合物，这使得 CO_2 灵敏型包装

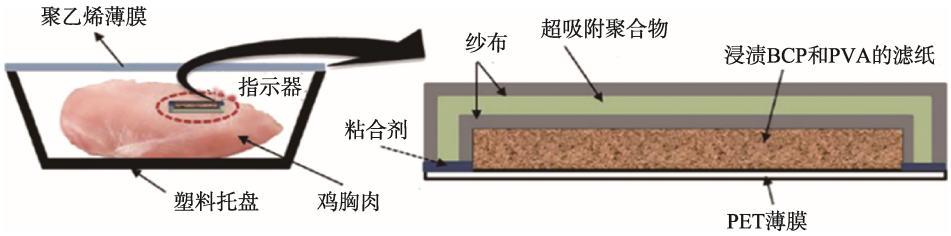

图 3　制备 pH 指示标签的结构

Fig.3 Structure of pH indicator

也可用于表征某些生鲜肉类的新鲜度[43]。此外，CO_2 是一种酸性气体，随着食品腐败过程中产生 CO_2，空间内的 pH 值会随之降低，将导致 pH 指示剂发生颜色变化。

已有研究发现各种 pH 染料，如溴甲酚绿、溴甲酚紫、甲酚红、甲基红、酚红等，可用于监测微生物生长导致的二氧化碳的形成[44]。研究人员以 CO_2 为监测指标，制备了一种基于 pH 敏感染料的指示标签，可用于实时监测去皮鸡胸肉的新鲜度。该指示染料分为 2 组，一组为溴百里酚蓝、溴甲酚绿和酚红的混合物；另一组为溴百里酚蓝和甲基红[45]。随后通过动力学方法将标签的颜色响应与鸡肉腐败相关联。结果表明混合 pH 染料指示剂的总色差与 CO_2 密切相关。

除了使用上述的化学 pH 指示剂，也可以通过 pH 依赖性乳清的透明度变化检测二氧化碳是否存在，例如世宗大学的研究人员[46]从乳清蛋白分离物（WPI）的水溶液中开发出 CO_2 指示剂，产生的 CO_2 会快速溶解在水性介质中，随后 pH 值降低，见图 4。随着时间的推移，含有 0.3%（质量分数）WPI 的 CO_2 指示剂 pH 值和透明度发生变化，表明在包装的顶部空间产生了 CO_2，导致 pH 值降低。在此基础上，研究人员还通过使用纳米多孔薄膜基材来提高其灵敏度，且可以在非渗透性聚合物表面上直接印刷[47]。对于 TVB-N 和 CO_2 的监测，都可以基于 pH 变化的原理制备新鲜度指示标签，天然提取物虽可用于以 CO_2 为指标的监测，但目前鲜有此方面的研究报道[48]。

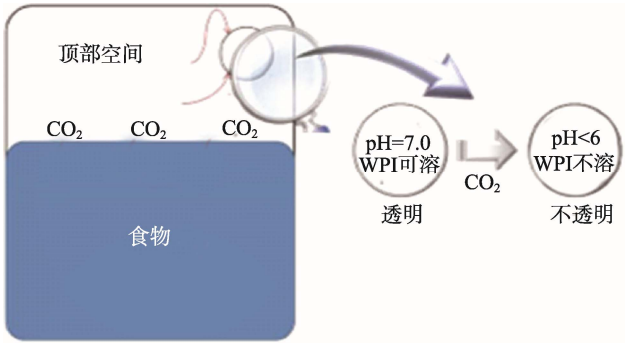

图 4　基于 WPI（乳清蛋白分离物）的二氧化碳指示剂
Fig.4 Carbon dioxide indicator based on WPI

2.3　硫化物敏感型指示标签

硫化合物由于具有典型的气味和低识别阈值，因此对肉制品的感官品质具有显著影响[49]。硫化氢（H_2S）由半胱氨酸产生并由葡萄糖限制引发。在气调包装条件下，H_2S 已被确定为生禽腐败过程中释放的主要挥发物之一。

H_2S 在与肌红蛋白结合时形成亚硫酸肌红蛋白，显示为绿色色素。Smolander 等[50]将肌红蛋白附着在琼脂糖上，利用肌红蛋白与 H_2S 反应生成绿色硫化肌红蛋白的原理，制备出了指示禽肉腐败的智能包装。

可利用 H_2S 较强的还原性与部分金属离子反应，获得期望的颜色变化，进而用于制备新鲜度指示标签。例如硝酸铅与 H_2S 的反应，指示剂会发生颜色变化，由棕变黑，可以利用该原理制备食品新鲜度指示标签，以监测包装内的 H_2S 含量，用以评估鲜肉食品的新鲜度[51]。有研究人员将壳聚糖作为生物聚合物基质，与硫酸亚铁组合制备 H_2S 气体的可生物降解基质指示剂，开发了一种快速指示标签，其比通常的 H_2S 检测方法快至少 130 倍，在 H_2S 暴露 30 秒后，指示剂变为黑色[52]。

2.4　其他类型

除了上述由食品正常腐败产生挥发物反应的指示剂之外，还提出了用于检测食品中微生物污染的其他系统。如微生物敏感型指示标签[53]，1996 年，劳伦斯伯克利国家实验室开发出了用于检测大肠杆菌肠毒素的特异性指示材料，这种传感器材料可以掺入包装材料中，其由交叉聚合的聚二乙炔分子组成，并显示深蓝色。特异性结合毒素的分子被捕获于该聚二乙炔基质中，当毒素与膜结合时，膜的颜色从蓝色变为红色。

3　结语

智能包装是一个多元学科交叉的领域，随着各领域技术的发展，智能包装尤其是智能标签会得到更广泛的应用。国内智能包装技术虽然起步较晚，但国家对食品包装行业的关注及政策支持推动了智能包装行业的迅速发展，保障了食品安全。

新鲜度指示包装可以实现快速安全的无损检测，未来若要实现商业化推广，可从以下几方面继续深入研究。

1）目前国内此项技术未商业化普及应用，主要制约因素是成本高、制作工艺复杂等，因此，需要改变其制备工艺、复合方法和材料，并利用新型材料以提高其灵敏度、稳定性，加强新鲜度指示标签的特异性识别、降低成本，进而推动其商业应用。

2）目前，国内外大量研究均使用化学药剂作为指示剂，由于使用过程中存在迁移现象，存在食品安全风险，因此可从结构和材料方面降低其迁移风险。虽然可利用天然色素作为指示剂，但由于天然色素物质结构不稳定，容易受到光照、温度等因素影响，因此在使用过程中存在一定的限制。基于 pH 值变化的颜色变化，不仅可应用于含氮化合物敏感型指示标签，也可以应用于基于相同原理其他代谢产物的指示。

3）由于新鲜度指示标签对包装形式有一定的要求，因此若进行商业化应用，还需进一步结合包装进

行结构优化。如采用气调包装，减少外界环境的影响，提高检测准确度；也可结合防盗包装设计，防止不法商家更换标签、以次充好的现象发生。

4）未来市场需要的是安全高效、高精度、低成本、轻便、环保的智能标签，需要面对更加复杂的应用场景，因此可能需要多种标签的组合或融合，即多功能智能标签。尤其是冷鲜食品，其对环境有着非常高的要求。不同的运输方式和流通环节，如传统运输和冷链运输、装卸和仓储，其环境差异不言而喻，会严重影响食品质量安全，由此对智能指示标签也提出了新的需求，即延伸其标签本身的功能和附加价值，进一步强化对多种环境的适用性。

参考文献：

[1] 邢月. 以 CO_2 为特征气体的新鲜度比色指示卡的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 4—6.
XING Yue. Study on Freshness Colorimetric Indicates Cards of Characterized Gas by CO_2[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015: 4—6.

[2] 张雪娇, 彭菁, 潘磊庆, 等. 食品质量指示器的研究与应用进展[J]. 肉类工业, 2019, 453(1): 39—50.
ZHANG Xue-jiao, PENG Jing, PANG Lei-qing, et al. Research and Application Progress of Food Quality Indicators[J]. Meat Industry, 2019, 453(1): 39—50.

[3] FANG Z, ZHAO Y, WARNER R D, et al. Active and Intelligent Packaging in Meat Industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 61: 60—71.

[4] 程述震, 王晓拓, 王志东. 冷鲜肉保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 194—198.
CHENG Shu-zhen, WANG Xiao-tuo, WANG Zhi-dong. Research Progress on Preservation Methods for Chilled Meat[J]. Food Research and Development, 2017, 38(16): 194—198.

[5] 曹丙湖. 关于冷鲜猪肉的保鲜包装技术的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017: 1—2.
CAO Bing-hu. The Influence of Different Packaging Materials on Chilled Pork Qualities[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2017: 1—2.

[6] WOJNOWSKI W, MAJCHRZAK T, DYMERSKI T, et al. Electronic Noses: Powerful Tools in Meat Quality Assessment[J]. Meat Science, 2017, 131: 119—131.

[7] PEREIRA D A D A, CRUZ J M, PASEIRO LOSADA P. Active and Intelligent Packaging for the Food Industry[J]. Food Reviews International, 2012, 28(2): 146—187.

[8] MOHEBI E, MARQUEZ L. Intelligent Packaging in Meat Industry: an Overview of Existing Solutions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(7): 3947—3964.

[9] HOLMAN B W B, KERRY J P, HOPKINS D L. A Review of Patents for the Smart Packaging of Meat and Muscle-based Food Products[J]. Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture, 2018, 9(1): 3—13.

[10] AHMED I, LIN H, ZOU L, 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: 449—471.

[11] CLARK J D. Method and Device for Indicating Spoilage: US, 2485566[P]. 1949-10-25.

[12] 谢勇, 刘林, 王凯丽, 等. 包装用智能标签的应用及研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 121—127.
XIE Yong, LIU Lin, WANG Kai-li, et al. Application and Research Progress of the Intelligent Label for Packaging[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 121—127.

[13] 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): 1.

[14] MUTWAKI L. Meat Spoilage Mechanisms and Preservation Techniques: a Critical Review[J]. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2011, 6(4): 486—510.

[15] NYCHAS G J E, SKANDAMIS P N, TASSOU C C, et al. Meat Spoilage During Distribution[J]. Meat Science, 2008, 78(1/2): 77—89.

[16] 王丽, 刘兆丰, 励建荣. 近红外光谱技术快速检测猪肉新鲜度指标的方法研究[J]. 中国食品学报, 2012(6): 159—165.
WANG Li, LIU Zhao-feng, LI Jian-rong. Rapid Determination of Pork Freshness Attributes by Near Infrared Spectroscopy[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012(6): 159—165.

[17] 叶永丽, 赫欣睿, 陈士恩, 等. 气相色谱及其联用技术在肉品检测中的应用进展[J]. 食品与机械, 2015(6): 242—245.
YE Yong-li, HE Xin-rui, CHEN Shi-en, et al. Application Progress of Gas Chromatography and Its Hyphenated Technology in Meat Products[J]. Food & Machinery, 2015(6): 242—245.

[18] CHENG J H, SUN D W, ZENG X A, et al. Recent Advances in Methods and Techniques for Freshness Quality Determination and Evaluation of Fish and Fish Fillets: a Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(7): 1012—1225.

[19] BUTLER P. Smart Packaging Technologies for Fast Moving Consumer Goods[M]. England: John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2008: 33—40.

[20] 孙媛媛, 张蕾. 猪肉新鲜度指示卡的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(5): 29—33.
SUN Yuan-yuan, ZHANG Lei. Pork Freshness Indicator Card Research[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(5): 29—33.

[21] 邹小波, 薛瑾, 黄晓玮, 等. 一种双层智能膜及其指示三文鱼新鲜度研究[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 206—212.

ZOU Xiao-bo, XUE Jin, HUANG Xiao-wei, et al. Research on Freshness Indicator Intelligent Packaging Material of Salmon Based on Natural Anthocyanins[J]. Food Science, 2019, 40(23): 206—212.

[22] BIJI K B, RAVISHANKAR C N, MOHAN C O, et al. Smart Packaging Systems for Food Applications: a Review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(10): 6125—6135.

[23] BOSCHER N D, BOHN T, HEIER P, et al. Optical Sensing Responses of CrIIICl(TPP)(H_2O)-based Coatings Obtained by an Atmospheric Pressure Plasma Method-application to the Detection of Volatile Amines[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 191: 553—560.

[24] SEMEANO A T S, MAFFEI D F, PALMA S, et al. Tilapia Fish Microbial Spoilage Monitored by a Single Optical Gas Sensor[J]. Food Control, 2018, 89: 72—76.

[25] GB 2707—2016, 食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品[S].
GB 2707—2016, Food Safety Standard for Fresh (Frozen) Livestock and Poultry Products[S].

[26] EC 2074/2005, Total Volatile Basic Nitrogen (TVB-N) Limit Values for Certain Categories of Fishery Products and Analysis Methods to Be Used[S].

[27] KUSWANDI B, DAMAYANTI F, ABDULLAH A, et al. Simple and Low-cost On-package Sticker Sensor Based on Litmus Paper for Real-time Monitoring of Beef Freshness[J]. Journal of Mathematical and Fundamental Sciences, 2015, 47(3): 236—251.

[28] KUSWANDI B, OKTAVIANA R, ABDULLAH A, et al. A Novel On-package Sticker Sensor Based on Methyl Red for Real-time Monitoring of Broiler Chicken Cut Freshness[J]. Packaging Technology and Science, 2014, 27(1): 69—81.

[29] 王冰雪, 宋向颖, 张爱武, 等. 猪肉新鲜度溴甲酚紫基指示卡的研究[J]. 包装与食品机械, 2014(6): 18—21.
WANG Bing-xue, SONG Xiang-ying, ZHANG Ai-wu, et al. Study on Bromine Cresyl Violet Basic Indicator Card for Freshness of Pork[J]. Pack Food Mach, 2014(6): 18—21.

[30] 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.

[31] DOWAN K, LEE S, LEE K, et al. Development of a pH Indicator Composed of High Moisture-absorbing Materials for Real-time Monitoring of Chicken Breast Freshness[J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1): 37—42.

[32] KUSWANDI B, LARASATI T S, ABDULLAH A, et al. Real-time Monitoring of Shrimp Spoilage Using On-package Sticker Sensor Based on Natural Dye of Curcumin[J]. Food Analytical Methods, 2012, 5(4): 881—889.

[33] 冯刚, 李洋, 王磊明, 等. 蓝莓新鲜度指示剂研究[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 6—10.
FENG Gang, LI Yang, WANG Lei-ming, et al. Blueberry Freshness Indicator[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 6—10.

[34] SHUKLA V, KANDEEPAN G, VISHNURAJ M R, et al. Anthocyanins Based Indicator Sensor for Intelligent Packaging Application[J]. Agricultural Research, 2016, 5(2): 205—209.

[35] 李琛, 康怡帆. 花色苷用作鱼肉鲜度指示标签[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 92—96.
LI Chen, KANG Yi-fan. Anthocyanins Used as Fish Meat Freshness Indicator Label[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(1): 92—96.

[36] ZHANG X, LU S, CHEN X. A Visual pH Sensing Film Using Natural Dyes from Bauhinia Blakeana Dunn[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 198: 268—273.

[37] CHOI I, LEE J Y, LACROIX M, et al. Intelligent pH Indicator Film Composed of Agar/Potato Starch and Anthocyanin Extracts from Purple Sweet Potato[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 122—128.

[38] HUANG X W, LI Z H, ZOU X B, et al. Detection of Meat-borne Trimethylamine Based on Nanoporous Colorimetric Sensor Arrays[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 930—936.

[39] POURJAVAHER S, ALMASI H, MESHKINI S, et al. Development of a Colorimetric pH Indicator Based on Bacterial Cellulose Nanofibers and Red Cabbage (Brassica Oleraceae) Extract[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 156: 193—201.

[40] SCHAUDE C, MEINDL C, FRÖHLICH E, et al. Developing a Sensor Layer for the Optical Detection of Amines during Food Spoilage[J]. Talanta, 2017, 170: 481—487.

[41] WANG W, LI M, LI H, et al. A Renewable Intelligent Colorimetric Indicator Based on Polyaniline for Detecting Freshness of Tilapia[J]. Packaging Technology & Science, 2018, 31(8): 133—140.

[42] SALIU F, DELLA PERGOLA R. Carbon Dioxide Colorimetric Indicators for Food Packaging Application: Applicability of Anthocyanin and Poly-lysine Mixtures[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 258: 1117—1124.

[43] 王圣. 花青素活性智能包装膜研制及其对猪肉的保鲜与新鲜度检测[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 3.
WANG Sheng. Development of Active and Intelligent Film by Using Anthocyanins for Preservation and Detection of Pork Freshness[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 3.

[44] DI H T J. Method for Determining Deleterious Bacterial Growth in Packaged Food Utilizing Hydrophilic Polymers: US, 6149952[P]. 2000-11-21.

[45] 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.

[46] JUNG J, PULIGUNDLA P, KO S. Proof-of-concept Study of Chitosan-based Carbon Dioxide Indicator for Food Packaging Applications[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2170—2174.

[47] LEE K, KO S. Proof-of-concept Study of a Whey Protein Isolate Based Carbon Dioxide Indicator to Measure the Shelf-life of Packaged Foods[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(1): 115—120.

[48] SHUKLA V, KANDEEPAN G, VISHNURAJ M R, et al. Anthocyanins Based Indicator Sensor for Intelligent Packaging Application[J]. Agricultural Research, 2016, 5(2): 205—209.

[49] CHOW C F, LIU S, CHAN C W, et al. A Bimetallic Re(I)-NCS-Pt(II)Solid-support Chemosensor for the Selective Detection of Dimethyl Sulfide in Spoiled Meat[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 255: 2298—2305.

[50] SMOLANDER M, HURME E, KYÖSTI L K, et al. Myoglobin-based Indicators for the Evaluation of Freshness of Unmarinated Broiler Cuts[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002, 3(3): 279—288.

[51] 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 Wen-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.

[52] JR E T K, YOSHIDA C M, REIS A B, et al. Fast Detection of Hydrogen Sulfide Using a Biodegradable Colorimetric Indicator System[J]. Polymer International, 2011, 60(6): 951—956.

[53] QUAN C, STEVENS R. Protein Coupled Colorimetric Analyte Detectors: WO, 036263[P]. 1998-08-20.