

智能指示标签在生鲜食品包装中的应用研究进展

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.1002

丁茜^{1,2} 王藜衡¹

1. 湖南工业大学

包装设计艺术学院

湖南 株洲 412007

2. 湖南省哲学社会科学

“过度包装设计治理

智能评价”重点实验室

湖南 株洲 412007

摘要: 智能指示标签作为智能包装系统的重要组成部分,能够实时监测、感应、记录生鲜食品在流通过程中所发生的物理、化学和生物变化,已成为当前保障食品安全、减少食品损耗的重要手段之一。智能指示标签既可以直接监测生鲜食品的代谢产物(如二氧化碳、乙烯等),也能间接从生鲜食品外部环境状态(如氧气、温度等)反映其新鲜度和安全性。其中,直接因素智能指示标签主要分为新鲜度指示型和成熟度指示型,而间接因素智能指示标签主要分为温度指示型和泄漏指示型。在此基础上,通过与射频识别(RFID)等信息技术相结合,智能指示标签还能实现生鲜食品品质信息的远程传输和可视化,从而有利于我国食品安全的全链条监管。

关键词: 智能包装技术; 指示标签; 生鲜食品; 信息技术; 食品安全

中图分类号: TB381; TS206

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2026)01-0013-10

引文格式: 丁茜,王藜衡. 智能指示标签在生鲜食品包装中的应用研究进展[J]. 包装学报, 2026, 18(1): 13-22.

“民以食为天,食以安为先”。随着我国“健康中国战略”的推进和“大食物观”的树立,如今的消费者不只关注食品的营养价值,更注重食品的新鲜度、产地信息以及供应链的透明度。特别是对于具有季节性、易腐性和地域性特点的生鲜食品而言,其在生产、运输、贮藏和销售各环节中的环境变化或不当处理均会引起食品品质下降,这不仅会造成大量的食品损耗,还会对消费者身体健康造成潜在风险。包装作为保障生鲜食品安全、传达生鲜食品信息的重要载体^[1],能够通过智能指示标签技术实现生鲜食品全链条流通过程中品质的实时监测,肩负着延长生鲜食品货架期、保障消费者安全的重要使命。

传统的生鲜包装标签主要通过印刷产地、生产日期、供应商等基本信息,以方便商品流通与销售。然

而,由于大部分生鲜食品不属于预包装食品,其储存、运输、配送条件缺少统一标准,这使得消费者难以实时判断生鲜食品的新鲜度和安全性。近年来,随着新型指示材料的研发与科学技术的进步,生鲜食品包装标签逐步从仅具有基本信息标识功能的传统标签发展到了集成多维技术、能够主动监测食品质量、自动传输食品数据的智能指示标签阶段,这对于优化我国生鲜食品供应链管理、保障食品安全与消费者健康具有重要意义。

大量研究表明,美欧等发达国家在生鲜食品包装智能指示标签领域的研究起步较早,并且部分公司研发的智能指示标签在生鲜食品包装市场中已有应用。例如,新西兰标签市场领导者 Jenkins Group Ltd. 早在 2003 年就成功研发了世界首款通过敏感变

收稿日期: 2025-11-02

基金项目: 湖南省哲学社会科学基金资助项目(22ZDB075); 湖南省研究生科研创新资助项目(LXBZZ2024329)

作者简介: 丁茜,女,副教授,博士,主要从事智能包装设计和功能包装材料研究, E-mail: dingqian@hut.edu.cn

色指示材料来显示水果成熟度的商用智能指示标签 Ripesense®。相比之下,受到研发技术、生产成本以及消费者接受度等因素的影响,智能指示标签在我国生鲜食品包装市场的应用较为少见。不过,目前我国学术界在天然无毒、高稳定性的生鲜食品智能指示标签的制备和新鲜度监测研究方面已取得一定进展。例如,杨舒婷^[2]、刘宇^[3]等分别从黑果枸杞和杨梅渣中提取花青素作为新鲜度指示标签染料,应用于鸡肉和鲜虾的新鲜度监测;赵洪喜等^[4]利用苏木色素作为新鲜度指示标签染料,应用于猪肉的新鲜度监测等。基于此,本研究系统综述了以果蔬、肉制品和水产品为包装对象的智能指示标签的国内外应用研究进展,以期为我国智能指示标签的开发与推广应用提供一定的科学依据与参考。

1 智能指示标签

智能指示标签是一种能够通过感知生鲜食品或其周围的气体成分、温度波动及 pH 值变化等情况,并以颜色等响应形式实现对包装内生鲜食品品质和安全的监测、识别与判断的新型标签。鉴于生鲜食品的品质受食品本身生理特性、贮运环境及包装等多方面因素影响,可以将智能指示标签分为直接因素智能指示标签和间接因素智能指示标签(见图1)。



图1 智能指示标签分类示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent indicator label classification

1.1 直接因素智能指示标签

直接因素智能指示标签是基于生鲜食品自身的生理特性,将生鲜食品在储存过程中产生的有机酸、生物胺、硫化物等特定代谢物及其浓度变化作为食品新鲜程度的监测指标。其中,新鲜度指示标签和成熟度指示标签最为常见。

1.1.1 新鲜度指示标签

新鲜度指示标签是当前生鲜食品包装中应用最

为广泛的智能指示标签之一,通过特定敏感材料与各类生鲜食品在腐败过程中所产生的代谢气体相互反应,将生鲜食品腐败程度转化为易于消费者识别的颜色变化信号^[5]。依据不同种类生鲜食品在腐败过程中所产生的主要代谢产物,可将新鲜度指示标签分为二氧化碳(CO₂)敏感型、碱性氮(如总挥发性盐基氮,TVB-N)敏感型和硫化物(如硫化氢,H₂S)敏感型三类(见表1)。

对于果蔬类生鲜食品而言,其在采摘后仍会保持呼吸作用,随着时间的推移,包装内CO₂浓度不断增加,果蔬新鲜程度不断降低。因此,CO₂浓度变化被普遍认为是监测果蔬新鲜度的重要指标^[21-22]。例如,Du H. Y.等^[6]以3:2的甲基红和溴百里酚蓝作为染料,混合0.5 g壳聚糖(CS)与3.0 g透明质酸,制备了一种用于草莓包装的CO₂敏感型新鲜度指示标签,随着存放时间的延长,包装内CO₂浓度逐渐增加,当CO₂浓度升至15%时,标签的颜色由最初的绿色逐渐变为橙红色,表明此时草莓已变质不能食用。而对于含有丰富蛋白质的肉制品和水产品而言,在酶和微生物的作用下会逐渐产生有毒的生物胺(BAs)和硫化物^[23],其中最具有代表性的代谢产物为TVB-N和H₂S,可作为评价肉制品和水产品新鲜程度的指标。Sun X. F.等^[24]合成了一种基于吩噻嗪衍生物(MPZ)的新型荧光探针负载滤纸(FPS)标签(MPZ/FPS),能够快速检测包装内鱼肉的TVB-N浓度。结果表明,在4℃的贮存条件下,新鲜鱼肉释放的TVB-N含量不断增加,到第7 d时增至30.8 mg/100 g,高于国标规定的变质界定30 mg/100 g,这说明鱼肉已经变质。在此过程中,MPZ/FPS标签在日光和荧光下的颜色分别由最初的黄色和橙红色逐渐转变为浅粉色和蓝色(见图2^[24]),表明鱼肉已不宜食用。

除此之外,生鲜肉品在储运过程中受温度、湿度和氧气的影响,会加速微生物、细菌繁殖,导致食品腐败,因此通过实时监测肉品中微生物的代谢产物也能准确判断生鲜肉品的新鲜度^[25]。例如,Guo J. X.等^[26]基于金纳米星的表面增强拉曼散射效应对细菌气态代谢物具有敏感反应,研发出一款能够快速检测大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等常见食源性细菌的气态代谢物智能传感器,其灵敏度远高于人的感官,可用于识别早期变质食品和实时跟踪食品变质程度。Feng J. L.等^[27]制备了一种基于适配

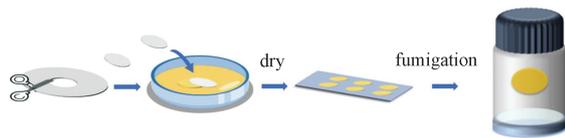
体和金纳米颗粒 (AuNPs) 的比色型传感器, 适用于监测冷切肉和水产品中的福氏志贺氏菌。相比于传统的微生物培养和其他分子检测方法, 该技术操

作简便, 可直接通过肉眼可见的颜色变化实时监测肉品是否受到微生物污染。

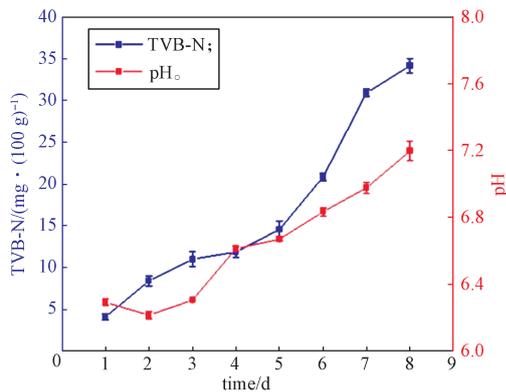
表 1 常见的生鲜食品新鲜度指示标签

Table 1 Common fresh food freshness indicator label

类型	应用对象	指示标签	颜色变化 (新鲜 - 不新鲜)	参考文献
二氧化 化碳 敏感型	草莓	一种复合甲基红 / 溴百里酚蓝 / 壳聚糖 / 透明质酸指示剂响应 CO_2	绿色 - 橙红色	[6]
	木瓜	一种复合溴百里酚蓝 / 羧甲基纤维素钠 / 卡拉胶指示剂响应 CO_2	蓝色 - 黄棕色	[7]
	蘑菇	一种复合蓝莓花青素 / 卵清蛋白 / 甘油 / 羧甲基纤维素指示剂响应 CO_2	紫色 - 粉红色	[8]
	石榴	一种复合溴甲酚绿 / 溴百里酚蓝 / 甲基红 / 醋酸纤维指示剂响应 CO_2	松绿色 - 灰白色	[9]
	香蕉	一种复合苏木提取物 / 葡甘露聚糖 / 聚乙烯醇指示剂响应 CO_2	黄色 - 深红色	[10]
碱性氮 敏感型	虾	一种复合姜黄素 / 花青素 / 明胶 / 甘油指示剂响应 TVB-N	红棕色 - 深棕色	[11]
	猪肉	一种复合溴百里酚蓝 / 海藻酸盐 / 甲基纤维素水凝胶指示剂响应 NH_3	橙色 - 黄色	[12]
	鱼肉	一种复合尖叶蓝花楸花青素 / 壳聚糖 / 聚乙烯醇指示剂响应 TVB-N	深灰色 - 黄色	[13]
	牛肉	一种复合红甘蓝花青素 / 聚乳酸指示剂响应 NH_3	粉色 - 蓝紫色	[14]
	鸡肉	一种复合彩叶草花青素 / 琼脂糖溶液指示剂响应 TVB-N	洋红色 - 绿色	[15]
硫化物 敏感型	鸡肉、猪肉、虾	一种复合金纳米团簇 / 碳点 / 聚乙烯醇纳米指示剂响应 H_2S	橙色 - 绿色	[16]
	鸡肉	一种复合纤维素纳米晶体 / 银纳米颗粒指示剂响应 H_2S	淡黄色 / 酒红色 - 金属灰	[17]
	鱼肉	一种复合苦野豌豆种子蛋白 / 铜纳米颗粒 / 聚乳酸双层抗菌指示剂 响应 H_2S	白色 - 棕色	[18]
	猪肉	一种复合细菌纤维素纳米晶体 / 银纳米颗粒 / 海藻酸盐 / 三氧化钨 指示剂响应 H_2S	浅灰色 - 深黄黑色	[19]
	鸡肉、鱼肉	一种复合氧化铋 / 硝化纤维素指示剂响应 H_2S	白色 - 棕色	[20]



a) MPZ/FPS 指示标签的制备流程



b) 4 °C 条件下 TVB-N 和 pH 值随时间的变化趋势



c) 8 d 内 MPZ/FPS 在日光和荧光下的颜色变化

图 2 MPZ/FPS 指示标签的制备工艺及其使用过程中随 TVB-N、pH 值的颜色变化

Fig. 2 The preparation process of MPZ/FPS indicator label and its color changes with TVB-N and pH value during application process

1.1.2 成熟度指示标签

作为果蔬特有的品质参数之一, 成熟度决定了果蔬的食用安全性与营养价值^[28]。成熟的果蔬不仅风味更佳, 同时营养价值也最大。相反, 未成熟

或过熟的果蔬不仅口感不良，还可能含有大量酸性物质，会对人体健康造成潜在风险。研究发现，果蔬在成熟过程中会产生乙烯（ C_2H_4 ）和引起包装内 pH 值变化的 CO_2 、硫化物、挥发性醛、挥发性有

机酸等代谢产物，可以与高锰酸钾（ $KMnO_4$ ）、钼酸铵等特定指示剂发生化学反应并产生颜色变化，从而为消费者提供可视化的水果成熟度判断依据（见表 2）。

表 2 常见的果蔬成熟度指示标签

Table 2 Common fruit and vegetable ripeness indicator labels

类型	应用对象	指示标签	颜色变化(未成熟-成熟-过熟)	参考文献
C_2H_4 敏感型	香蕉	一种复合水凝胶-铜纳米粒子/氮掺杂碳量子点指示剂响应 C_2H_4	浅绿色-黄色-棕色	[29]
	奇异果	一种复合高锰酸钾/玻璃纤维纸指示剂响应 C_2H_4	紫色-过渡色-棕色	[30]
	香蕉	一种复合钼酸铵/聚乙烯醇指示剂响应 C_2H_4	黄色-青黄色-深蓝色	[31]
	牛油果	一种复合木薯淀粉/钼酸铵指示剂响应 C_2H_4	黄色-绿色-深蓝色	[32]
pH 敏感型	葡萄	一种基于氯酚红/甘油指示剂响应因挥发性有机酸引起的 pH 变化	白色-米色-黄色	[33]
	猕猴桃	一种复合甲基红/溴甲酚紫/壳聚糖/蜂蜡比色纸指示剂响应挥发性醛引起的 pH 值变化	蓝紫色-深红色-红色	[34]
	榴莲	一种复合甲基红/溴百里酚蓝/木薯淀粉/壳聚糖指示剂响应硫化物引起的 pH 值变化	红色-橙色-黄色	[35]
	香蕉	一种复合木薯淀粉/壳聚糖/花青素/儿茶素响应酶等代谢产物引起的 pH 值变化	红色-暗红色或红黄色-黄色	[36]

C_2H_4 作为植物内源激素，在大多数果蔬成熟过程中 C_2H_4 浓度变化呈现出特定规律，即 C_2H_4 的释放量随着水果成熟度的升高而增加^[37]。因此， C_2H_4 被认为是一种能与成熟度指示标签相互作用的重要化学物质^[38]。基于此，Shin D. U. 等^[30] 利用 $KMnO_4$ 制备了一种奇异果成熟度指示标签，发现 $KMnO_4$ 指示标签的颜色随着包装内 C_2H_4 含量的增加逐渐从紫色变为棕色，并且指示标签的变色程度与 C_2H_4 产生量及其接触时间相关，取决于 $KMnO_4$ 与 C_2H_4 气体之间的氧化还原反应程度。除了 $KMnO_4$ 外，钼酸铵也能与 C_2H_4 气体发生化学反应产生钼蓝，同时伴随着肉眼可见的颜色变化，即由钼酸铵的黄色转变为钼蓝的深蓝色，可用于监测评估牛油果、香蕉等水果的成熟度^[31]。V. J. Putri 等^[39] 先将活化后的纳米沸石浸泡于钼酸铵溶液中制得片状的纳米沸石-钼酸铵成熟度指示剂，再将其放置于低密度聚乙烯(LDPE)材质的牛油果包装内。结果显示，随着牛油果放置时间的增长，纳米沸石-钼酸铵成熟度指示剂颜色由黄色逐渐变为深蓝色，同时牛油果伴随着软化和变色等现象，证实了牛油果从未熟到成熟的过程。此外，对于具有特殊气味的鲜切水果（如榴莲）而言，由于其成熟过程中会逐渐释放能够与 pH 指示剂染料发生反应的硫化物，可采用甲基红/溴百里酚蓝等 pH 指示剂染料监测其成熟过程。A. Niponsak 等^[35] 通过将甲基红/溴百里酚蓝 pH 指

示剂染料与木薯淀粉/壳聚糖的生物基材料复合，制成了一种能够监测榴莲成熟度的环保型成熟度指示标签。结果发现，鲜切榴莲在 30 °C 下放置 3 d 后，标签颜色从最初的红色变为橙色，说明榴莲已经成熟可食用，再继续放置 2 d，标签颜色由橙色变为黄色，说明榴莲已经过熟不宜食用。

1.2 间接因素智能指示标签

间接因素智能指示标签是基于生鲜食品包装和贮运环境，将生鲜食品周围氧气、温度等外部环境变化作为食品新鲜程度的监测指标。其中，温度指示标签和泄漏指示标签最为常见。

1.2.1 温度指示标签

低温储存是生鲜食品最常见的保鲜方法之一，它通过使用专门的冷藏设备和保温设施能够有效减缓生鲜食品在运输过程中的微生物增殖，进而延长食品的货架期。然而，设备故障、操作失误和环境因素等会导致冷链运输过程出现温度失控的现象，与此同时，当前物流运输过程中存在温度监测盲区。因此，亟须借助温度指示标签来监测生鲜食品运输过程中的低温稳定性，以便及时提醒相关人员采取应对措施^[40]。

目前，时间-温度指示标签(TTI)是生鲜食品包装温度监测应用最广泛的技术之一，它主要通过物理反应(如扩散、溶解等)、化学试剂、酶以及微生物之间相互作用产生不可逆的颜色变化，以此对生鲜

食品包装贮运温度进行实时监控^[41]。胡泽茜等^[42]以木糖和甘氨酸为基材、磷酸氢二钾(K_2HPO_4)为催化剂制备了一种美拉德反应型 TTI 标签。通过模拟桑葚冷链流通过程,发现该 TTI 的颜色变化与桑葚品质变化规律一致,且 TTI 与桑葚的失重率、花青素、可溶性固形物等品质指标的等效温度值相差小于 $1\text{ }^\circ\text{C}$,可用于准确监测桑葚的有效货架期。不过,鉴于传统的 TTI 标签只能监测冷链车厢内的整体温度变化而不能监测单个包装内的温度变化,研发人员尝试制备了适用于单个包装的 TTI 标签。例如, Yar M. S. 等^[43]以苋菜叶提取物(ALE)为指示剂染料制备了一种新型的生物基 TTI 标签,可用于实时监测单个包装内牛肉的温度波动和新鲜度。此外,冷链运输过程中存在反复冷冻和解冻的现象,也会影响生鲜食品的新鲜度。为此, Cao Y. R. 等^[44]以聚乙烯醇-海藻酸钠(PVA-SA)胶为基材,氮掺杂的绿色荧光碳点(N-GCDs)和牛血清白蛋白包裹金纳米簇(BSA-AuNCs)为荧光探针,成功研发了一种双响应的荧光水凝胶 TTI 标签,可以同时监测食品冷链运输中包装内的温度变化和食品新鲜度。结果表明,一方面基于 N-GCDs 溶剂的色温特性,可以通过溶剂溶入凝胶后的荧光颜色变化实现温度监测;另一方面,基于 N-GCDs/BSA-AuNCs/PVA-SA 水凝胶的 pH 效应,可以根据鱼肉腐败过程产生大量 TVB-N 引起的变色,进一步监测温度失控后的食品新鲜度。

1.2.2 泄漏指示标签

在生鲜食品供应链中,气调包装(MAP)和真空包装是维持生鲜食品品质的重要包装形式。其中,MAP 能够通过控制包装内部 O_2 、 CO_2 、 N_2 等气体成分及含量,延长生鲜食品的货架期。然而,此类包装在运输过程中易受物理冲撞或搬运不当造成其刺穿、破损,导致包装内部特定气体氛围遭到破坏,最终使包装丧失原有的保鲜功能。因此,通过添加泄漏指示标签来监测包装内 O_2 含量变化,不仅能够预防由包装完整性受损导致的生鲜食品变质情况发生,还能够协助仓储管理人员、消费者及时识别和评估包装保鲜功能的有效性。

亚甲基蓝(MB)能够在碱性环境下被葡萄糖还原为亚甲基白,呈现无色,而在空气中易被氧化还原为蓝色的氧化态 MB,因此可用作生鲜食品包装泄漏指示标签中的氧化还原染料^[45]。不过,由于泄漏指示标签通常位于包装内侧,氧化还原染料在接触到

生鲜食品所挥发的水分时,可能会迁移至食品表层,造成食品污染。为此,有研究者尝试将具有防水特性的多糖或聚合物作为保护涂层,能够有效阻止 MB 变色响应时向食品迁移的行为,提高了指示标签的安全性。M. Yilmaz 等^[46]对比分析了无聚苯乙烯(PS)涂层和有 PS 涂层的聚乙烯醇(PVOH)纳米纤维氧气指示剂中染料的泄漏情况,发现虽然无 PS 涂层和有 PS 涂层的氧气指示剂都能在无氧和有氧条件下发生显著的颜色变化,但无 PS 涂层的氧气指示剂的染料泄漏实验值为 $29.60\% \pm 1.85\%$,远高于涂覆 PS 后氧气指示剂的 $0.30\% \pm 0.02\%$ 泄漏量。

2 信息技术赋能智能指示标签

随着信息科技的快速发展,越来越多不同形式的信息载体被应用于生鲜食品智能包装,以实现生鲜食品“从田间到餐桌”全链条数据信息的记录、追踪和共享,进而提高食品安全的透明度和消费者参与度。例如,快速响应矩阵码(QR 码)、射频识别技术(RFID)以及近场通信技术(NFC)能够与温度、湿度、pH 等智能指示标签结合,以达到远距离、快速监测生鲜食品品质及包装环境变化的目的(见图 3)。

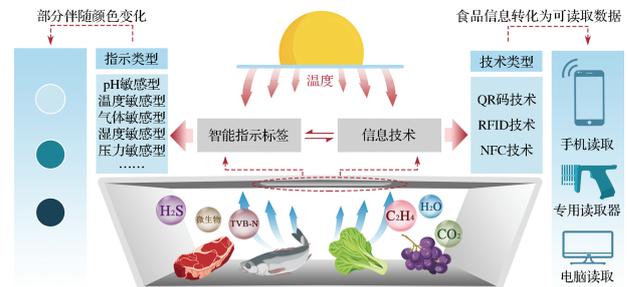


图 3 信息技术赋能智能指示标签示意图

Fig. 3 Schematic diagram of information technology empowering intelligent indicator labels

2.1 QR 码

QR 码是一种将特定的几何图形按一定规律分布在黑白相间的图案中,以宽度和长度共同记录数据的信息符号来实现信息数据双向记录的二维码^[47]。现阶段,QR 码标签凭借制作成本低、使用门槛低、普及度高以及接受度高等优势,在生鲜食品包装防伪、溯源以及营销等方面占据重要地位。尽管 QR 码不是所有生鲜食品包装上必备的标识,但它作为包装信息补充工具,能够额外向消费者传递生鲜食品的产地、品种、种植等信息^[48]。

不过,QR 码的信息通常是预先录入的静态数据,

难以实时反映生鲜食品在全链条流通过程中的品质动态变化。通过采用温变油墨或 pH 值敏感油墨进行 QR 码印刷,可以在保留 QR 码信息存储功能的同时,兼顾对生鲜食品品质的实时监测功能。其中,来源于天然植物的花青素与姜黄素对环境酸碱度具有高敏感性,能够与其他功能性材料复合制成染色油墨,可用于多功能的 QR 码标签的印刷。Zhang H. Z. 等^[49]利用花青素/姜黄素的混合墨水与热致变色微胶囊粉末的水性油墨复合,成功研制了一种具有传感和信息存储双重功能 QR 码标签并应用于草鱼包装。结果表明,当草鱼在 4 °C 下贮藏至第 7 d 时,包装内 TVB-N 含量达到 20.07 mg/100 g,此时 QR 码左上角的新鲜度感应区由粉红色变为淡粉色,表明草鱼已变质不宜食用;不仅如此,该 QR 码右上角的热变色区能够在 (5.0 ± 0.5) °C 至 (20.0 ± 0.5) °C 之间表现出可逆的颜色变化,以此来获取草鱼包装储运时的实时温度变化。此外, P. Escobedo 等^[50]研发了一种内置多重传感器的 QR 码标签,可用于监测生鲜食品包装中的 H₂S、NH₃ 和 CO₂ 含量和包装环境的温度、湿度变化(见图 4a)。在此基础上,该团队还开发了一款 QRsens 智能手机应用程序,消费者通过选择扫描 QR 码直接读取编码信息或者扫描传感器进入图像分析两个选项,能够进行后续信息查询、色彩校正、数据存储和结果共享(见图 4b)。



图 4 多重传感器集成的 QR 码标签及 QRsens 智能手机应用程序

Fig. 4 QR code label integrated with multiple sensors and QRsens smartphone app

2.2 RFID

RFID 是一种基于无线射频信号的双向通信识别技术,能够采用无线、非接触的方式,对目标信息数据进行储存^[51],目前已广泛应用于生鲜食品的运输和仓储管理。此外,RFID 标签还能够复合不同类型的传感器,以固定的时间间隔将生鲜包装内外温度、气体等变化数据记录在 RFID 的存储器中^[52],管理人员可通过 RFID 专属读写设备进行数据读取。与 QR 码和 NFC 相比,RFID 最大的优势在于能够远程、批量读取数据,通过对生鲜食品流通全程的品质监控与溯源追踪,有效提升了生鲜食品物流管理的智能化、精准化水平。

G. S. Lorite 等^[53]研发了一款低成本、快速响应的 RFID 温度传感器,通过将临界温度指示剂(CTI)集成到 RFID 标签上,以监测鲜切果蔬的供应链温度波动。研究表明,当运输或储藏温度达到鲜切果蔬腐败风险的临界温度 18~19 °C 时,CTI 内部溶剂通过相变反应改变标签无线电路的阻抗,而这一信号能够被远距离的 RFID 读取设备实时捕获,从而为供应链管理人员提供实时的果蔬变质预警。此外, T. Athauda 等^[54]合成了一款壳聚糖水凝胶,再将其与 RFID 结合制成了一款新型的“无线”pH 传感器。该传感器能够在 3~7 GHz 频段下远程工作,并对生鲜食品包装内的 pH(在 4~10 范围内)表现出高敏响应。在此基础上,将 RFID 与多种敏感材料复合使用,可以实现对 CO₂、乙醇气体和温度等指标的选择性响应。Tao B. R. 等^[55]设计了一款可以同时监测温度、二氧化碳和乙醇的集成式 RFID 传感器,该传感器能分别以 1.1 × 10⁴ dB、6.5 × 10⁵ MHz 和 0.25 dB/°C 的高灵敏度快速响应果蔬储运过程中的 CO₂、乙醇的浓度变化和温度波动,在果蔬包装新鲜度监测领域具有较高的应用价值。

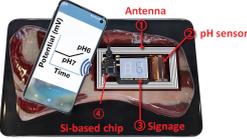
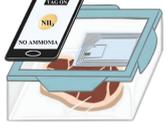
2.3 NFC

NFC 是一种短距离无线通信技术,由非接触式射频识别技术和互连互通技术整合演变而来,具有高效、私密和传输快等优势^[56]。当兼容设备相互靠近的情况下,NFC 能够通过电磁感应实现设备之间的信息识别和数据交换,从而避免了依靠互联网进行信息交换带来的不稳定性。随着 NFC 智能手机的普及,越来越多的 NFC 智能标签被开发应用于生鲜食品包装。目前,NFC 智能标签可以结合 pH、湿度、气体以及温度等敏感型传感器(见表 3),使消费者能够

通过 NFC 智能手机快速、准确地获取生鲜食品的新鲜度信息。

表 3 不同类型的 NFC 传感标签在生鲜食品包装中的应用

Table 3 Application of different types of NFC sensor labels in fresh food packaging

类型	应用对象	图片	介绍	参考文献
pH 传感标签	鲜肉		通过 pH 电致变色显示器监测并显示包装内的 pH 值, 再利用 NFC 与智能手机将包装内 pH 值变化数据传输至云端数据库, 分析和评估鲜肉的新鲜程度	[57]
湿度传感标签	葡萄		将实时收集的葡萄存放过程中的温度和质量变化信息传输至 NFC 读取器中, 结合水分传感器系统对数据进行处理并转化为葡萄的水分损失率, 以此预测葡萄的剩余货架期	[58]
气体传感标签	鲜肉		NFC 标签的电阻会随氨气浓度升高而增加, 当 NFC 标签正常工作时表明氨气浓度较低, 若反射信号变化则表明氨气浓度升高, 鲜肉可能已经变质	[59]
温度传感标签	鸡肉		功能化氧化石墨烯-聚偏氟乙烯封装层的热敏电阻 NFC 标签能够通过手机稳定监测并记录鸡肉包装在 -10~30 °C 范围内的温度变化, 当包装环境温度超出最佳温度范围, 手机端会警报, 提醒鸡肉面临高温变质风险	[60]
应变传感标签	鲜肉		当手机靠近包装表层 NFC 标签时, LED 灯亮起表示包装内未产生腐败气体, 鲜肉可食用; 若 LED 灯未亮起表示包装内已存在大量腐败气体膨胀, 此时鲜肉已变质	[61]

为了方便消费者获得新鲜度监测结果, 研究人员还尝试开发了与 NFC 新鲜度传感器相匹配的手机应用程序 (见图 5) [62]。该程序通过直观的颜色编码和数字呈现, 提高了消费者识别和提取生鲜食品信息的便捷性。同时, 用户还可以在应用程序中选择要检查的生鲜食物种类, 屏幕上会显示被测食物的测量 pH 值及正常 pH 值的参考范围等, 进而为消费者提供健康的食用建议。



图 5 NFC 食品新鲜度监测程序的用户界面
Fig. 5 User interface of the NFC food freshness monitoring program

3 总结与展望

智能指示标签通过颜色变化直观展示包装本身及内部食品状态, 而信息技术赋能智能指示标签可以将食品与包装环境变化信息转化为可读取的数据, 不仅能够实时监测生鲜食品品质与安全, 还能实现生鲜食品包装与云端数据平台联动, 从而为生鲜食品和消费者提供更多的安全保障。尽管当前生鲜食品智能指示标签的研究已取得显著进展, 但在推广应用过程中仍面临诸多挑战。

1) 部分智能指示标签仍采用溴甲酚绿、甲基红、溴百里酚蓝等化学合成变色材料, 而传统纸质载体基材的阻隔性不高, 因此合成染料在使用过程中存在向包装内迁移的安全隐患, 今后需要开发更多天然、无毒的敏感变色指示材料, 如花青素、姜黄素等。

2) 文献报道中智能指示标签的制备及性能测试大多是在实验室可控条件下进行, 而在真实流通过程中生鲜食品的运输和储存条件多为低温环境, 这就要求进一步增加智能指示标签的防雾、防潮、耐低温

等功能,例如选用具有较好耐低温性和耐磨损性的双向拉伸聚丙烯半透明膜或耐低温标签纸作为基材,以确保智能指示标签信息的清晰度和持久性。

3)虽然智能指示标签与RFID、NFC等信息技术结合后,能够实现生鲜食品新鲜度实时信息的远程传输和可视化,但这也增加了智能指示标签的生产成本。目前,智能指示标签的研发和制备成本约占包装总成本的50%~80%,可见未来需要加强对可共享、可循环、可回收的信息化智能指示标签的设计研发。

参考文献:

- [1] 李昭,闫蕊,孙建明,等.交互式智能包装在生鲜类食品中的应用研究[J].包装学报,2020,12(4):57-64.
- [2] 杨舒婷,邝芳玲,余礼,等.黑果枸杞花青素智能显色膜的制备和性能研究[J].包装学报,2024,16(3):38-44.
- [3] 刘宇,王晨宇,房佳璇,等.负载杨梅渣花青素双层纳米纤维膜的制备及其在虾新鲜度监测中的应用[J].食品科学,2025,46(10):257-266.
- [4] 赵洪喜,周景廉,尹兆京,等.苏木色素-滤纸指示标签的制备及其对猪肉新鲜度的监测[J].包装工程,2024,45(19):190-198.
- [5] WU S S, ZHANG M, YU Q, et al. Fresh Food Quality Deterioration Detection and Labeling: A Review of Recent Research and Application in Supply Chain[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(7): 1706-1726.
- [6] DU H Y, LIU X R, SUN X L, et al. CO₂-Responsive Multifunctional Label Based on Chitosan and Hyaluronic Acid for Visualizing and Maintaining Postharvest Freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110438.
- [7] RONG L Y, ZHANG T T, MA Y C, et al. An Intelligent Label Using Sodium Carboxymethyl Cellulose and Carrageenan for Monitoring the Freshness of Fresh-Cut Papaya[J]. Food Control, 2023, 145: 109420.
- [8] LIU L M, WU W N, ZHENG L M, et al. Intelligent Packaging Films Incorporated with Anthocyanins-Loaded Ovalbumin-Carboxymethyl Cellulose Nanocomplexes for Food Freshness Monitoring[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132908.
- [9] KOMALI N D, GAIKWAD P S, YADAV B K. Fabrication of Cellulose Acetate Membrane for Monitoring Freshness of Minimally Processed Pomegranate (*Punica Granatum*) Arils[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101945.
- [10] ARDIYANSYAH, KURNIANTO M F, POERWANTO B, et al. Monitoring of Banana Deteriorations Using Intelligent-Packaging Containing Brazilien Extract (*Caesalpinia Sappan* L.)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 411(1): 012043.
- [11] MOHSENI-SHAHRI F S, MOEINPOUR F. Development of a pH-Sensing Indicator for Shrimp Freshness Monitoring: Curcumin and Anthocyanin-Loaded Gelatin Films[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(7): 3898-3910.
- [12] SUTTHASUPA S, PADUNGKIT C, SURIYONG S. Colorimetric Ammonia (NH₃) Sensor Based on an Alginate-Methylcellulose Blend Hydrogel and the Potential Opportunity for the Development of a Minced Pork Spoilage Indicator[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130151.
- [13] AMAREGOUDA Y, KAMANNA K, GASTI T. Fabrication of Intelligent/Active Films Based on Chitosan/Polyvinyl Alcohol Matrices Containing Jacaranda Cuspidifolia Anthocyanin for Real-Time Monitoring of Fish Freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 218: 799-815.
- [14] KARIMI ALAVIJEH D, HELI B, AJJI A. Development of a Sensitive Colorimetric Indicator for Detecting Beef Spoilage in Smart Packaging[J]. Sensors, 2024, 24(12): 3939.
- [15] TALUKDER S, MENDIRATTA S K, BISWAS A K, et al. Monitoring of Chicken Meat Quality by Plant Dye Based Sensor[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(10): 2217-2230.
- [16] HUANG Y, CHEN S M, HUANG W, et al. Visualized Test of Environmental Water Pollution and Meat Freshness: Design of Au NCS-CDs-Test Paper/PVA Film for Ratiometric Fluorescent Sensing of Sulfide[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137292.
- [17] KWON S, KO S. Colorimetric Freshness Indicator Based on Cellulose Nanocrystal-Silver Nanoparticle Composite for Intelligent Food Packaging[J]. Polymers, 2022, 14(17): 3695.
- [18] DODANGE S, SHEKARCHIZADEH H, KADIVAR M. Preparation of Active/Intelligent Packaging Antibacterial Film and Hydrogen Sulfide-Sensitive Indicator for Trout Fillets Freshness Based on Copper Nanoparticles[J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104323.
- [19] SUKHAVATTANAKUL P, MANUSPIYA H. Influence of Hydrogen Sulfide Gas Concentrations on LOD and LOQ of Thermal Spray Coated Hybrid-Bacterial Cellulose

- Film for Intelligent Meat Label[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 254: 117442.
- [20] JAISWAL M, KUMAR R, TRIPATHI R M, et al. Rapid and Reversible Detection of Trace Amounts of H₂S in Air and Packaged Food Using a Biogenic Bismuth Oxide Nanorod Colorimetric Sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 381: 133395.
- [21] UMEOHIA U E, OLAPADE A A. Physiological Processes Affecting Postharvest Quality of Fresh Fruits and Vegetables[J]. *Asian Food Science Journal*, 2024, 23(4): 1–14.
- [22] 王洪江, 刘露, 唐培浩, 等. 食品包装用比色型 CO₂ 指示油墨 [J]. *包装学报*, 2019, 11(4): 16–23.
- [23] WANG H J, YIN W Z, MA H, et al. Benzophenoxazine-Based Colorimetric and Fluorescent Probe for Highly Sensitive Detection of Amines and Food Freshness[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2023, 302: 123004.
- [24] SUN X F, JIANG X, ZHAO X Y, et al. Colorimetric and Fluorescent Probe Assisted by Smartphone App for Monitoring Fish Freshness[J]. *Food Chemistry*, 2025, 473: 143013.
- [25] OSMÓLSKA E, STOMA M, STAREK-WÓJCICKA A. Application of Biosensors, Sensors, and Tags in Intelligent Packaging Used for Food Products: A Review[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9956.
- [26] GUO J X, LIU Y, YANG Y J, et al. A Filter Supported Surface-Enhanced Raman Scattering “Nose” for Point-of-Care Monitoring of Gaseous Metabolites of Bacteria[J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(7): 5055–5063.
- [27] FENG J L, SHEN Q, WU J J, et al. Naked-Eyes Detection of *Shigella Flexneri* in Food Samples Based on a Novel Gold Nanoparticle-Based Colorimetric Aptasensor[J]. *Food Control*, 2019, 98: 333–341.
- [28] Anjali, JENA A, BAMOLA A, et al. State-of-the-Art Non-Destructive Approaches for Maturity Index Determination in Fruits and Vegetables: Principles, Applications, and Future Directions[J]. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2024, 6(1): 56.
- [29] LOHRASBI NEJAD S, SHEKARCHIZADEH H. An Agar Hydrogel-CuNPs/N@CQDS Dual-Mode Colorimetric/Fluorescent Indicator for Non-Destructive Monitoring of Banana Ripening[J]. *Food Chemistry*, 2025, 473: 143098.
- [30] SHIN D U, PARK B J, CHO H W, et al. Potassium Permanganate-Based Ethylene Gas Indicator of Kiwifruit Ripeness[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 200: 112330.
- [31] WARSIKI E, ISKANDAR A, GHIYAS H M. Theoretical Calculation and Experimental Validation of Ammonium Molybdate Concentration for Fruit Ripeness Indicator Label[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 472(1): 012017.
- [32] WARSIKI E, ASFIANI A, RARDNIYOM C. Softness Indicator Made from Tapioca and Ammonium Molybdate for Avocado[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1358(1): 012014.
- [33] KUSWANDI B, MURDYANINGSIH E A. Simple on Package Indicator Label for Monitoring of Grape Ripening Process Using Colorimetric pH Sensor[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017, 11(4): 2180–2194.
- [34] LIU Y W, MA Y L, FENG T, et al. Development and Characterization of Aldehyde-Sensitive Cellulose/Chitosan/Beeswax Colorimetric Papers for Monitoring Kiwifruit Maturity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 187: 566–574.
- [35] NIPONSAK A, LAOHAKUNJIT N, KERDCHOE-CHUEN O, et al. Novel Ripeness Label Based on Starch/Chitosan Incorporated with pH Dye for Indicating Eating Quality of Fresh-Cut Durian[J]. *Food Control*, 2020, 107: 106785.
- [36] SANTOSO V R, PRAMITASARI R, ANUGRAH D S B. Development of Indicator Film Based on Cassava Starch-Chitosan Incorporated with Red Dragon Fruit Peel Anthocyanins-Gambier Catechins to Detect Banana Ripeness[J]. *Polymers*, 2023, 15(17): 3609.
- [37] HAILU F W, FANTA S W, TSIGE A A, et al. Current Status and Challenges of Colorimetric Intelligent Packaging for Fruit and Vegetables: A Review[J]. *Journal of Food Quality*, 2025, 2025: 6669828.
- [38] YU W Q, MA P H, SHENG J P, et al. Postharvest Fruit Quality of Tomatoes Influenced by an Ethylene Signaling Component During Long-Term Cold Storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 422: 136087.
- [39] PUTRI V J, WARSIKI E, SYAMSU K, et al. Application Nano Zeolite-Molybdate for Avocado Ripeness Indicator[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 347(1): 012063.
- [40] 陈景华, 林晨璐, 方应大为, 等. 热致变色材料的变色机理及其在智能包装中的应用 [J]. *包装学报*, 2024, 16(6): 81–91.
- [41] 崔子杰, 刘丹飞, 陈思源, 等. 微胶囊化脂肪酶型 TTI 的制备及其性能研究 [J]. *包装学报*, 2022, 14(3): 60–68.

- [42] 胡泽茜, 李洋, 崔琢玉, 等. 冷链物流环境下时间温度指示器的制备与应用[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 246–257.
- [43] YAR M S, HENRY IBEOGU I, ADNAN M, et al. A Novel Bio-Based Time-Temperature Dependent Colorimetric Indicator Film Incorporated with Amaranthus Leaf Extract for Beef Freshness Tracking[J]. Food Chemistry, 2025, 480: 143906.
- [44] CAO Y R, CHEN M T, LI J L, et al. Continuous Monitoring of Temperature and Freshness in Cold Chain Transport Based on the Dual-Responsive Fluorescent Hydrogel[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 137981.
- [45] BOONYARATTANAKALIN K, RATTAN P, SONGPANIT M, et al. The Effect of Polyvinyl Alcohol Addition on the Optical Properties and Oxygen Detection Performance of Titanium Dioxide and Methylene Blue Nanocomposite Colorimetric Indicators[J]. Polymers, 2024, 16(10): 1400.
- [46] YILMAZ M, ALTAN A. Optimization of Functionalized Electrospun Fibers for the Development of Colorimetric Oxygen Indicator as an Intelligent Food Packaging System[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 28: 100651.
- [47] LI P F, YANG J J, JIMÉNEZ-CARVELO A M, et al. Applications of Food Packaging Quick Response Codes in Information Transmission Toward Food Supply Chain Integrity[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 146: 104384.
- [48] ROTSIOS K, KONSTANTOGLU A, FOLINAS D, et al. Evaluating the Use of QR Codes on Food Products[J]. Sustainability, 2022, 14(8): 4437.
- [49] ZHANG H Z, XU Y, LUO M X, et al. Integrated Food Quality Monitoring QR Code Labels with Simultaneous Temperature and Freshness Sensing in Real-Time[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(5): 4834–4842.
- [50] ESCOBEDO P, RAMOS-LORENTE C E, EJAZ A, et al. QRsens: Dual-Purpose Quick Response Code with Built-in Colorimetric Sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 376: 133001.
- [51] LI X, LIU D, PU Y, et al. Recent Advance of Intelligent Packaging Aided by Artificial Intelligence for Monitoring Food Freshness[J]. Foods, 2023, 12(15): 2976.
- [52] YUE C Z, WANG J Y, WANG Z Q, et al. Flexible Printed Electronics and Their Applications in Food Quality Monitoring and Intelligent Food Packaging: Recent Advances[J]. Food Control, 2023, 154: 109983.
- [53] LORITE G S, SELKÄLÄ T, SIPOLA T, et al. Novel, Smart and RFID Assisted Critical Temperature Indicator for Supply Chain Monitoring[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 193: 20–28.
- [54] ATHAUDA T, BANERJEE P C, KARMAKAR N C. Microwave Characterization of Chitosan Hydrogel and Its Use as a Wireless pH Sensor in Smart Packaging Applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 8990–8996.
- [55] TAO B R, BAI J N, WU H, et al. Design and Research of Multi-Information Fusion RFID Sensor for Fruit and Vegetable Quality Detection[J]. Mikrochimica Acta, 2024, 191(9): 568.
- [56] KARPAVIČĚ J, HAFITH I A, TAMBO T, et al. Experimental Approaches to NFC-Enabled Packaging for UX/CX of Physical Artefacts: A Technology Maturity Study[J]. Procedia Computer Science, 2023, 219: 577–585.
- [57] SHRESTHA K, KIM Y, JUNG Y, et al. Wireless pH-Logger Label for Intelligent Food Packaging[J]. Flexible and Printed Electronics, 2021, 6(4): 044001.
- [58] XIAO X Q, FU Y F, YANG Y Y, et al. Battery-Free Wireless Moisture Sensor System for Fruit Monitoring[J]. Results in Engineering, 2022, 14: 100420.
- [59] ZHOU X, XU J X, CHEN D Z, et al. Ternary Nano-Composite Wireless Ammonia Sensor Based on Polyaniline/CuTsPc/AgNPs for Food Intelligent Packaging[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2024, 414: 135928.
- [60] MASKEY B B, SHRESTHA K, SUN J F, et al. Proving the Robustness of a PEDOT: PSS-Based Thermistor via Functionalized Graphene Oxide-Poly(Vinylidene Fluoride) Composite Encapsulation for Food Logistics[J]. RSC Advances, 2020, 10(21): 12407–12414.
- [61] ESCOBEDO P, BHATTACHARJEE M, NIKBAKHTNASRABADI F, et al. Flexible Strain and Temperature Sensing NFC Tag for Smart Food Packaging Applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26406–26414.
- [62] NGUYEN T B, NGUYEN T H, CHUNG W Y. Battery-Free and Noninvasive Estimation of Food pH and CO₂ Concentration for Food Monitoring Based on Pressure Measurement[J]. Sensors, 2020, 20(20): 5853.

(责任编辑: 李玉华)
(下转第 29 页)