

# 新鲜度智能监测包装研究进展

戴璐 薛雯

陕西农林职业技术大学 陕西咸阳 712100

**摘要:** 新鲜度智能监测包装作为食品包装领域的前沿方向,通过集成传感材料、智能识别与数据解析技术,实现对易腐食品品质的实时、无损、可视化评估,为减少食品浪费、保障食品安全及优化供应链提供关键支撑。本文系统梳理比色指示、气体传感、时间-温度积分(TTI)及AI融合监测四大技术路径的最新进展,重点分析其在果蔬、肉类、水产品等典型品类中的应用场景,深入探讨材料安全性、稳定性、成本控制及标准化等核心挑战,并展望低成本可降解材料、多模态传感、边缘AI与全链条追溯的融合趋势,为推动该技术的产业化落地提供参考。

**关键词:** 新鲜度监测;智能包装;人工智能;食品安全

## 引言

易腐食品在采后贮藏、物流运输及销售环节中,易因温度波动、微生物繁殖、气体组分变化等因素发生品质劣变,造成全球约1/3的食品损耗。传统包装以被动保护为核心,依赖固定保质期标签,无法反映食品实际状态,易导致“未过期已变质”或“未变质而过早丢弃”的双重浪费。新鲜度智能监测包装通过在包装中集成传感器、指示材料或智能模块,实时捕捉食品腐败相关的特征信号,并通过可视化、数字化方式反馈品质状态,实现从“静态保质期”到“动态新鲜度”的管理转型。近年来,材料科学、传感技术与人工智能(AI)的快速发展,推动新鲜度智能监测包装向高灵敏、低成本、可降解、智能化方向演进。本文从技术分类、应用场景、核心挑战与未来趋势四个维度展开讨论,旨在为该领域的研究与产业化提供系统参考。

## 一、核心技术分类与研究进展

### 1. 比色指示技术

比色指示技术是目前应用最广泛的新鲜度监测方案,核心是利用响应材料与食品腐败产物或环境因素发生特异性反应,通过颜色变化直观反映新鲜度,具有无需电源、操作便捷、成本低廉的优势。

#### (1) 响应材料体系

**基金项目:** 陕西农林职业技术大学(原杨凌职业技术学院)科研基金项目(SJ2023-002)。

**第一作者/通讯作者:** 戴璐(1988—)女,博士,副教授。研究方向:食品安全与营养。

天然色素材料,如花色苷(蓝莓、紫甘薯提取物)、姜黄素、胭脂虫红等生物相容性材料,通过pH变化触发颜色转变(如花色苷在酸性下呈红色、中性呈紫色、碱性呈蓝色)。例如,江南大学团队以3D打印制备双颜色CO<sub>2</sub>比色标签,通过色差值( $\Delta E$ )与果蔬失重率的关联,实现冷链中CO<sub>2</sub>积累的快速可视化。

合成响应材料,如甲基红、溴甲酚绿、吡啶类化合物等,具有高灵敏度与选择性,适用于复杂食品体系。中国农业科学院开发的小分子近红外比率荧光-比色双信号标签,对H<sub>2</sub>S具有高响应性,结合手机图像分析可实现猪肉、牛肉新鲜度实时判别,准确率达97.3%。

纳米复合与MOF材料,如金属有机框架(MOFs)、量子点等纳米材料,通过多孔结构提升气体吸附与响应效率。例如,卤素掺杂碳点荧光标签可实现400-650 nm波长全覆盖,对生物胺的响应灵敏度较传统探针提升数倍。

#### (2) 技术优势与局限

比色指示技术的优势在于可视化直观、无需专用设备、成本低(单标签成本约0.05-0.2美元);但存在响应速度较慢、易受光照/湿度影响、定量精度有限等局限。

### 2. 气体传感技术

气体传感技术通过集成电化学、光学或半导体传感器,定量检测包装内气体组分(O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、乙烯、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>等)的浓度变化,实现对食品生理状态的精准评估,适用于高附加值食品与精密冷链场景。

#### (1) 传感器类型与原理

电化学传感器通过气体氧化还原反应产生电流信号,定量精度高(检测限达ppm级),适用于CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>等气体监测。例如,果蔬包装中集成的CO<sub>2</sub>电化学传感

器，可实时反馈呼吸强度，指导冷链调控。

半导体气体传感器利用金属氧化物（如 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ ）表面气体吸附导致的电导率变化，响应速度快（ $<1\text{ s}$ ），但易受湿度干扰，需通过算法补偿。

光学气体传感器基于红外吸收、荧光猝灭等原理，抗干扰性强，适用于恶劣环境。例如，基于可调谐二极管激光吸收光谱（TDLAS）的乙烯传感器，可实现果蔬采后成熟度的无损监测。

### （2）技术应用与挑战

气体传感技术目前在果蔬冷链（监测乙烯积累以调控贮藏温度）、肉类包装（实时反馈 $\text{H}_2\text{S}$ 生成）、气调包装（MAP）的气体比例优化方面应用较广，但存在传感器长期稳定性差、成本较高、与包装材料的兼容性需优化等挑战。

## 3. 时间-温度积分（TTI）技术

TTI技术通过记录包装在贮藏过程中的温度累积效应，模拟食品品质劣变速率，以颜色变化或形态改变指示剩余货架期，核心是建立温度响应动力学与食品腐败的关联，适用于全程冷链食品。

### （1）工作原理与类型

扩散型TTI利用染料在粘性介质中的扩散速率随温度变化的特性，颜色扩散面积与温度累积正相关，例如冷鲜肉包装中使用的扩散型TTI， $25^\circ\text{C}$ 下6 h完全变色， $4^\circ\text{C}$ 下72 h保持稳定。反应型TTI基于酶促反应、水解反应等化学过程，反应速率随温度升高而加快，颜色突变指示腐败临界点。聚合物型TTI利用聚合物的热致相变或降解，实现温度阈值预警，适用于高温敏感食品。

### （2）技术应用与局限

TTI技术通过AI算法优化动力学模型，将预测误差控制在 $\pm 5\%$ 以内，适配不同食品的温度响应特征；结合湿度、光照传感器，开发多因素TTI，可提升复杂环境下的准确性。但TTI技术仅反映温度累积，无法直接表征食品实际品质，与食品腐败速率的匹配度需针对不同品类优化；响应曲线不可逆，无法重复使用，且易受包装内气体组分影响等局限。

## 4. AI融合监测技术

AI技术（机器学习、深度学习、计算机视觉）的融入，推动新鲜度监测从定性指示向定量预测与智能决策转型，实现多源数据的融合分析与动态预警。

### （1）核心技术

图像识别与分级，基于CNN（卷积神经网络）的计算机视觉技术，对食品外观（颜色、纹理、硬度）进行

特征提取，实现新鲜度分级。多源数据融合预测，整合温度、湿度、气体浓度、TTI数据，通过RNN（循环神经网络）、LSTM（长短期记忆网络）等模型预测剩余货架期，预测误差可控制在 $\pm 3\%$ 以内。边缘AI与物联网（IoT），将轻量化AI模型部署于包装边缘模块（如NFC标签、微型芯片），结合5G/LoRa通信，实现冷链全链条的实时监控与异常预警。例如，欧盟FreshSure项目通过AI视觉系统与智能标签结合，将海鲜腐败率降低20%。

### （2）技术突破

轻量化模型，针对包装端的低功耗需求，开发参数量 $< 500\text{KB}$ 的TinyML模型，边缘设备功耗降至 $0.2\text{W}$ ，续航时间延长至3年。数字孪生，构建包装-食品-环境的数字孪生模型，模拟不同贮藏条件下的品质变化，实现精准调控。

## 二、典型应用场景

### 1. 果蔬冷链

果蔬采后持续呼吸，消耗 $\text{O}_2$ 、释放 $\text{CO}_2$ 与乙烯，导致成熟与腐败。智能监测包装通过 $\text{CO}$ /乙烯传感+比色指示+AI预测，实现全链条监控：

前端，通过3D打印 $\text{CO}_2$ 比色标签或乙烯电化学传感器，实时反馈呼吸强度；中端，通过AI模型结合温度数据，动态预测剩余货架期，优化运输路径；终端，通过手机APP扫描标签，获取新鲜度评分，指导消费者决策。例如，江南大学团队的果蔬供应链监测方案，通过“标签设计-信号采集-算法识别-移动端呈现”的全链条构建，已在草莓、蓝莓等浆果中完成验证，采后损失降低30%。

### 2. 肉类与水产品

肉类、水产品富含蛋白质，腐败过程中产生TVB-N、 $\text{H}_2\text{S}$ 、生物胺等特征产物。智能包装采用比色指示+气体传感+边缘AI组合，其核心指标为TVB-N、 $\text{H}_2\text{S}$ 浓度与温度累积；其技术方案为荧光-比色双信号标签（响应 $\text{H}_2\text{S}$ ）+电化学TVB-N传感器+轻量化CNN模型，能实现实时预警腐败，避免不合格产品流入市场，同时减少因过度保鲜导致的浪费。

### 3. 乳制品与即食食品

乳制品的品质变化与乳酸菌活性、pH值密切相关，即食食品则受微生物繁殖与氧化影响。智能包装以pH比色指示+TTI为主，乳制品以pH敏感膜颜色变化反映乳酸菌数量，结合TTI指示货架期；即食食品依靠集成温感变色材料（如智能温感铝箔袋），温度超过阈值时由蓝变红，警示温度滥用；该方式适配常温/冷链场景，成本

低廉，消费者易接受。

### 三、核心挑战与瓶颈

#### 1. 材料安全性与稳定性

智能包装存在一定安全性风险，例如合成染料（如偶氮类）可能迁移至食品，存在潜在毒性；纳米材料（如量子点）的生物安全性尚未完全验证，需符合EFSA、FDA等法规要求。此外存在比色材料易受光照、湿度、温度影响，导致响应漂移；气体传感器在长期贮藏中易老化，灵敏度下降等稳定性问题。拟采用天然色素与生物基聚合物（壳聚糖、淀粉、PLA）制备响应材料以改进，或通过化学修饰（如酰化、交联）提升材料稳定性。

#### 2. 成本与规模化生产

智能标签/传感器成本为传统包装的3-10倍，难以覆盖大众食品的溢价空间，成本差距显著；智能包装需整合印刷电子、3D打印、MEMS等技术，与传统包装生产线兼容性低，规模化生产难度大；拟通过推进低成本可降解材料（如淀粉基复合材料）的研发、开发印刷化传感器等以降低成本。

#### 3. 标准化与跨学科协同

目前智能包装仍存在标准缺失、跨学科壁垒等挑战，不同技术路径的检测指标、响应阈值、验证方法不统一，缺乏行业标准与认证体系；涉及材料科学、食品科学、AI、物联网等多领域，协同不足导致技术落地缓慢。建立多部门联合标准体系；推动产学研合作，构建“材料-传感-算法-应用”全链条创新平台。

### 四、未来发展趋势

#### 1. 绿色化与可持续包装

以淀粉、PHA、海藻酸盐等生物基材料为载体，集成可降解传感器与指示材料，实现包装与传感器的同步降解，减少电子垃圾；将抗菌剂、氧气清除剂与智能传感模块结合，主动改善包装微环境的同时实时监测品质，实现活性-智能一体化、“保鲜+监测”双功能。

#### 2. 多模态传感与精准监测

多参数融合，通过集成温度、湿度、气体、pH、生物标志物等多传感器，构建多模态监测体系，适配不同食品的腐败特征；生物传感升级，开发酶传感器、免疫传感器，直接检测食品中的腐败标志物（如组胺、肌苷酸），提升监测精度。

### 3. AI与物联网深度融合

将轻量化模型嵌入包装终端，实现本地数据解析与实时预警，降低云端依赖，提升响应速度；结合区块链技术，将监测数据、物流信息、品质状态上链，实现从产地到消费者的全流程可追溯，打击食品欺诈；优化AI模型与图像识别算法，使消费者通过手机拍照即可获取精准新鲜度评分，无需专业设备；开发印刷化比色标签、无芯片RFID标签，将单标签成本下降，推动在大众食品中的应用。

### 结论

新鲜度智能监测包装已从实验室研究逐步走向产业化应用，比色指示、气体传感、TTI及AI融合技术的协同发展，为保障食品安全、减少食品浪费提供了有效解决方案。当前，材料安全性、成本控制、标准化与数据可靠性是制约技术普及的核心瓶颈。未来，随着绿色可降解材料、多模态传感、边缘AI与区块链技术的深度融合，新鲜度智能监测包装将向低成本、高精度、全可降解、全链条智能方向发展，构建“监测-预警-调控-追溯”的闭环体系，为食品供应链的高质量发展提供关键支撑。

### 参考文献

- [1] 梁力生, 杨雯雯, 李梅, 等. 结构色响应型食品智能包装的研究与应用进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 496-503.
- [2] 刘平, 鞠睿, 李丽梅, 等. 智能指示包装在食品质量监测中的应用[J]. 粮食科技与经济, 2024, 49(04): 116-120.
- [3] 胡子聪, 胡春, 周晨光. 智能包装在食品质量监测中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2025, 46(11): 128-139.
- [4] Chebil A, Mazzaracchio V, Duranti L, et al. Paper-based metal-air battery electrochemical sensor for smartphone-assisted oxygen monitoring in food packaging[J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2025, 394116922-116922.
- [5] 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(06): 81-91.