

# 响应型食品包装的研究现状及前景展望

梁旭茹, 岳淑丽\*, 张硕, 柏美任, 徐玉洁

(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 响应型食品包装是新型食品包装的主要研究方向。区别于传统包装, 响应型食品包装加入了能对食品本身或外界刺激(如光、温度、湿度、pH值)作出反应的刺激响应型材料, 当食品包装内或外界条件发生变化时, 包装材料发生可观察到的颜色变化或内部的结构变化, 使包装内外变化可视化或释放包装材料内的活性物质, 从而实现对食品品质的监控和改善。该文结合国内外研究进展, 将响应型食品包装根据刺激种类分为物理响应型(光、温度、湿度)、化学响应型(pH值、挥发性硫化物)、生物影响型(微生物和酶)和多响应型四大类, 并介绍了不同种类的响应型食品包装的研究进展。最后, 综合分析了响应型食品包装在工业化生产中面临来自生产、销售和安全性等多方面的问题与挑战, 以及展望响应型食品包装在未来的发展潜力。

**关键词:** 响应型; 食品包装; 物理响应; 化学响应; 生物响应

文章编号: 1673-9078(2025)01-370-380

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1437

## Research Status and Prospects of Responsive Food Packaging

LIANG Xuru, YUE Shuli\*, ZHANG Shuo, BAI Meiren, XU Yujie

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Responsive food packaging is a major research direction of new food packaging. Unlike traditional packaging, responsive food packaging is incorporated with stimulus-responsive materials that respond to the food itself or external stimuli (e.g., light, temperature, humidity, pH value). When there are changes in the internal or external conditions of food packaging, the packaging material undergoes observable changes in color or internal structure, so that the internal and external changes in the packaging can be visualized or the active substances inside the packaging material are released, thereby realizing the monitoring and improvement of food quality. Based on the domestic and international research progress, this paper classifies stimuli-responsive food packaging into four categories according to the type of stimuli: physically responsive type (light, temperature, humidity), chemically responsive type (pH value, volatile sulfide), biological impact type (microorganisms and enzymes), and multi-responsive type. Moreover, the research advances of different kinds of responsive food packaging are also presented. Finally, this paper analyzes comprehensively the problems and challenges faced by the responsive food packaging during industrial manufacturing from production, marketing, safety and other aspects, as well as the development potential of responsive food packaging in the future.

**Key words:** stimuli-responsive; food packaging; physically responsive; chemically responsive; biologically responsive

引文格式:

梁旭茹,岳淑丽,张硕,等.响应型食品包装的研究现状及前景展望[J].现代食品科技,2025,41(1):370-380.

LIANG Xuru, YUE Shuli, ZHANG Shuo, et al. Research status and prospects of responsive food packaging [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 370-380.

收稿日期: 2023-11-30

基金项目: 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室开放课题资助(202112); 安利(中国)日用品有限公司科研项目(Am20220353RD); 广东省农业农村厅项目(2023LZ03)

作者简介: 梁旭茹(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 响应型食品包装、食品保鲜, E-mail: lxr@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 岳淑丽(1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 包装工程、果蔬保鲜、精油微胶囊, E-mail: ysl@scau.edu.cn

在食品储存、运输和销售的过程中，食品本身和外界环境存在很多刺激因素如水分、pH值、光照、气体成分、微生物等，可能会对食品产生不利的影响，从而缩短食品货架期<sup>[1,2]</sup>。

传统食品包装通常采用石油基聚合物作为主要包材，简单地为食品提供了抵抗环境中如微生物、物理化学损害、光照等不良因素的物理屏障，使食品的保质期得到了延长<sup>[3]</sup>。也因其具有低成本、良好的气体阻隔性和机械性能等优点而被广泛应用<sup>[4]</sup>。然而传统包装并不能对发生在食品包装内的品质劣变和储藏环境的变化进行及时的检测和反应，容易造成食物浪费，甚至引发食品安全事故<sup>[5]</sup>。为了解决这一问题，研究者们研发了一系列对食品劣变和储藏环境变化具有高灵敏度的响应型食品包装<sup>[6]</sup>。

响应型食品包装的关键组分是能根据周围环境调整其物理化学性质和结构构象的刺激响应型材料。使用该种材料制作的响应型包装会对食品或环境中的刺激做出反应，以实现对其质量的安全检测，并且有效延长食品的货架期<sup>[7]</sup>。近年来，刺激响应型材料得到了越来越多的研究，但大部分研究都集中在材料科学、递送体系以及医学等研究领域，在食品包装中的应用十分有限<sup>[8]</sup>，同时表明了响应型食品包装仍具有巨大的发展潜力。

响应型食品包装根据工作原理主要为信息响应型和智能控释型<sup>[9]</sup>。信息响应型食品包装主要通过检测到的信号作出响应，并将包装内的变化转化成可测定的颜色反应或形变，向消费者提供信息<sup>[10]</sup>。智能控释型包装在外部条件或内部成分发生变化时，其材料结构发生变化，使材料中包埋的活性物质得到释放，或促使包装内外的气体成分进行交换，对食品的品质进行及时的改善措施<sup>[11]</sup>。

本文通过对响应型食品包装相关文献进行综述，详细介绍响应型食品包装的种类，可应用在响应型食品包装上的刺激响应型材料、响应型食品包装在工业化生产中可能会遇到的问题及其发展前景。

## 1 响应型食品包装的分类

根据食品储运销售过程中能引起响应的刺激种类划分，响应型包装可以主要划分为物理响应型（温度、光照、湿度）、化学响应型（pH值、挥发性硫化物）、生物响应型（微生物和酶）和多响应型四种。

## 1.1 物理响应

### 1.1.1 温度响应

在食品储藏运输的过程中，难免存在温度升高和温度波动的情况，而温度对食品品质的影响极大，在温度较高的情况下，微生物的生长繁殖和不饱和脂肪酸等活性成分的氧化加剧，会使得食品的安全和品质降低。所以，温度变化导致食品品质的劣变问题一直是个有待解决的课题。目前，越来越多的研究尝试将温度响应型材料和食品包装相结合，以期能提高食品的保存期<sup>[12]</sup>。

温度响应型材料能对温度的变化作出快速响应，在药物输送和智能包装等温度触发应用中具有很高的应用价值<sup>[13]</sup>。温度响应型材料应用于食品包装中的方式主要有以下两种：

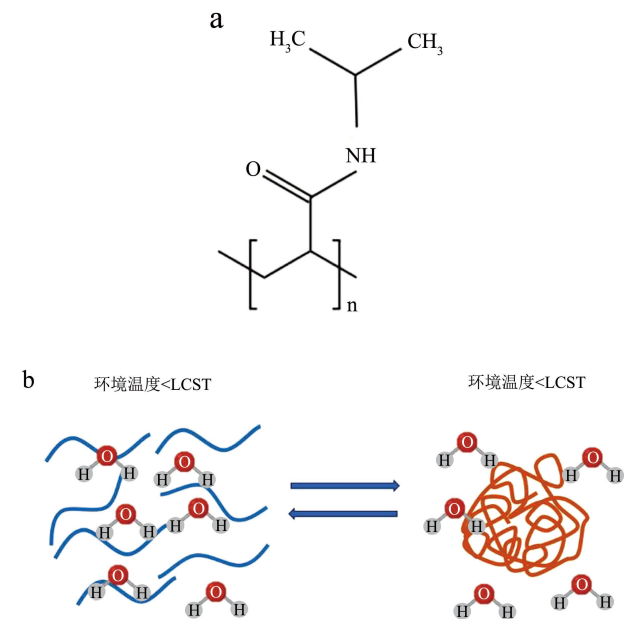


图1 (a) 温度响应性聚合物聚异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM) 结构式; (b) PNIPAM 的温度响应性原理

Fig.1 (a) Structural formula of the temperature-responsive polymer poly (N-isopropylacrylamide) (PNIPAM); (b) Principle of temperature responsiveness of PNIPAM

第一种材料在溶液的临界溶液温度下会发生化学键的改变，导致材料在溶剂中出现溶解度的突变。具体表现为聚合物在溶液中由均匀分散的形态变为比较紧密的固体结构。其中最具代表性的材料为PNIPAM<sup>[14,15]</sup>。聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)是一种热响应聚合物，具有特定的低临界溶液温度(32℃)。如图1b所示，当其所在的环境温度低于LCST时，PNIPAM具有亲水性，分子中的酰胺基

团能与水分子形成氢键，聚合物结构呈现较为松弛的状态；当温度高于 LCST 时，PNIPAM 分子中的亲水酰胺基团被疏水性异丙基甲基屏蔽，释放出水分子，聚合物链段呈现收缩的状态<sup>[16]</sup>。研究者们利用该物质的这一特性，开发了一系列温度响应型包装材料。

Li 等<sup>[17]</sup>采用自由基聚合法合成了聚 N- 异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM)、聚 N- 叔丁基丙烯酰胺 (PBAM) 和聚丙烯酸 (PAA) 纳米复合水凝胶，并将百里香酚 (THY) 包埋在纳米复合凝胶中，设计了一种具有抗菌活性的响应型纳米复合水凝胶。结果表明 PNIPAM 和 PBAM 摩尔比为 65:35 的纳米复合水凝胶具有较好的 pH 值、温度和盐离子响应性，其低温释药时间 (24 h 以上) 明显长于高温释药时间 (6 h 左右)。此外，纳米颗粒还可以通过静电作用吸附在壳聚糖膜上，以温度响应抑菌膜的形式应用于食品包装。Douki 等<sup>[18]</sup>通过静电纺丝和旋涂等方法将 PNIPAM 和电响应性材料聚 (3,4- 乙烯二氧基噻吩基)：聚 (苯乙烯磺酸) (PEDOT : PSS) 覆盖在含有肉桂精油 (CEO) 的聚碳酸亚丙酯 (PPC) 电纺纤维上。当该薄膜导电 (室温 2 V 或 4 °C 2.6 V) PEDOT : PSS 将电能转化为热能或环境温度升高至 PNIPAM 的 LCST 时，均可引起薄膜内 CEO 的控制释放。

除 NIPAM 外，也有研究者开发出了新的温度响应性材料，并应用于食品包装中。Bi 等<sup>[19]</sup>在由氢氧化钾和尿素组成的绿色均匀的体系中合成了一系列羟丁基壳聚糖 (HBC)，该种材料在水溶液中具有明显的温度响应行为。当温度超过其临界相变温度时，HBC 会从溶解状态转变为纳米水凝胶状态，且该种变化可进行多次重复而不发生凝胶，具有较强的稳定性。将该种材料应用于食品包装的智能窗，可吸收环境中的紫外光，并实现对食品包装的光调节能力，具有较大的应用潜力。

第二种材料具有较低的熔点，当环境温度高于该材料的熔点时，该种材料融化，使得封装的活性释放出来，从而达到控制释放的目的。Zampino 等<sup>[20]</sup>合成了熔融温度约为 50 °C 的咪唑离子液体 (ILS)，并通过溶液浇铸的方法将其负载到聚醚和生物基聚酰胺的共聚物中。研究表明，复合膜的气体透过率随着温度的升高而增加，其阶跃变化与离子液体中的固-液相变化相对应。根据加热-冷却循环顺序，可以观察到二氧化碳的特定渗透行

为，通过简单的调节温度来实现包装内气体透过率的调控。

除此之外，Mohammad 等<sup>[21]</sup>将氯化镍、氯化铬和 1- 乙基 -3- 甲基咪唑氯 (EMIMCl) 的离子液体 [NiCl<sub>2</sub>-EMIMCl] 或 [CrCl<sub>3</sub>-EMIMCl] 注入纤维素纳米纤维网络 (CNF) 中，并将其制备成具有高孔的水热变色纳米泡沫和柔性薄膜。研究表明，在 20 °C 至 80 °C 的温度区间内，离子液体配位结构中的水分子取代了离子液体结构中的 Cl<sup>-</sup>，使材料的颜色发生变化。含有 [NiCl<sub>2</sub>-EMIMCl] 的纳米泡沫的颜色从淡绿色转变为蓝色，含有 [CrCl<sub>3</sub>-EMIMCl] 的薄膜颜色从绿色转变红色。这为开发新型温度响应型包装提供了新的思路。

### 1.1.2 光响应

光照是食品保藏过程中的一大重要因素。和其他触发因素不同，光 (红外线、紫外线辐射或自然光) 可以在不直接接触食品的情况下触发材料响应，是少数可用的远程控制触发因素之一<sup>[22]</sup>。

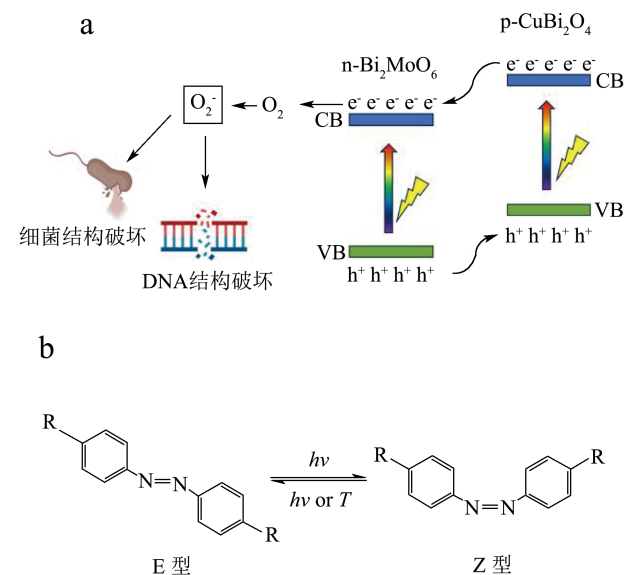


图 2 不同光响应型材料原理

Fig.2 Principles of different light-responsive materials

注：(a) 光催化剂 CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub> p-n 异质结在光照条件下产生活性氧 ROS 并破坏细菌结构的过程；(b) 光响应材料偶氮苯在光照下的 E-Z 异构化。

在现有的研究中，将光催化和包装技术结合起来延长食品保鲜期是近年来的发展趋势之一。在一定的光照条件下，光催化剂表面将产生电子 (e<sup>-</sup>) 和空穴 (h<sup>+</sup>)，它们可以进一步和包装内的氧气与水反



应生成活性氧 (ROS)<sup>[23]</sup>。如图 2 所示, ROS 具有较强的杀菌效果, 可破坏微生物细胞膜和 DNA 结构<sup>[24]</sup>。同时, ROS 可将包装内的乙烯氧化为二氧化碳和水, 达到抑制微生物和降低乙烯浓度的双重效果<sup>[25]</sup>。因此, 具有光催化功能的包装在果蔬保鲜中具有较大的潜力。

Wang 等<sup>[26]</sup>采用层层自组装法 (LBL) 将可见光响应纳米复合材料 QDs@ZIF-8 NPs 均匀嵌入 CS/SA 复合膜基体中, 制备了一系列具有光催化抗菌和乙烯清除功能的保鲜膜 (CS/SA/QDs@ZIF-8), 并应用于猕猴桃的保鲜中。QDs@ZIF-8 NPs 在可见光照射后产生 ROS, 可杀灭保鲜膜内的食源性微生物, 并对保鲜膜内的乙烯进行降解和吸附作用, 有效地延长了猕猴桃的货架期。Ni 等<sup>[27]</sup>通过纳米技术开发出带负电石墨氮化碳 (NCN), 再通过静电自组装技术制备了一种壳聚糖 / 带负电石墨氮化碳 (CS/NCN) 自激活生物纳米复合膜。该薄膜在初始阶段抗菌活性较低, 在可见光激活后, 其对大肠杆菌的抗菌效率可达 99.8%, 对金黄色葡萄球菌的抗菌效率可达 99.9%, 可以将柑橘的保质期延长至 24 天。经过溶血和细胞实验测试, 证明该膜安全无毒, 可应用于食品包装上。

除此之外, 也有研究者利用光响应材料的异构化, 开发出在一定光照条件下, 能够使抑菌物质进行控制释放的包装<sup>[28]</sup>。Marturano 等<sup>[29]</sup>通过乳液界面聚合获得一种基于交联聚酰胺的紫外光响应的纳米胶囊。由于该胶囊壁材聚合物主链的偶氮苯部分结构在紫外光的照射下会发生 E-Z 异构化 (如图 2a 所示), 导致胶囊壳聚合物链的构象重排, 从而引发封装的百里香油的受控释放。Marturano 等<sup>[30,31]</sup>将这种紫外光响应的纳米胶囊作为聚乙烯和聚乳酸薄膜的功能涂层, 使得涂膜具有一定的抗菌活性。经过处理后的涂膜在紫外线下曝露 15 min, 静置 24 h 后, 其顶部空间中百里香油的浓度比未照射的膜高八倍, 实验证明了该种材料的光响应抑菌性能。

### 1.1.3 湿度响应

湿度也是影响食品品质的重要因素。在果蔬储运的过程中, 由于果蔬自身的蒸腾作用和冷链运输中的冷却操作, 包装内相对湿度通常保持在较高水平, 并呈现周期性的波动<sup>[32]</sup>。

乙烯-乙烯醇共聚物 (EVOH) 是一种由乙烯和乙烯醇单体单元组成的高分子材料, 其孔隙率在湿度升高时增大, 导致气体扩散速率的增加。研究

者们利用这一特点, 研发出用 EVOH 包埋抑菌物质, 开发出了一系列具有湿度响应性的抑菌包装<sup>[33,34]</sup>。Zhang 等<sup>[35]</sup>用同轴静电纺丝法制备出具有核壳结构的百里香酚 (THY) /EVOH 纳米纤维膜, 并将其应用到了草莓的保鲜中。在相对湿度较高 (90%) 的情况下, THY 的释放量明显高于相对湿度低 (30%) 的环境。在保鲜实验中, 应用 THY/EVOH 的草莓货架期更长, 具有更好的保鲜效果。Petchwattana 等<sup>[36]</sup>在 EVOH 涂布纸的基础上开发了香叶醇精油抗菌香囊 (如图 3 所示), 研究表明, 包装内抗菌剂含量随着相对湿度的增加而增加。用抗菌香包储存的面包腐烂时间延长了三周, 有效延长了面包的保质期。

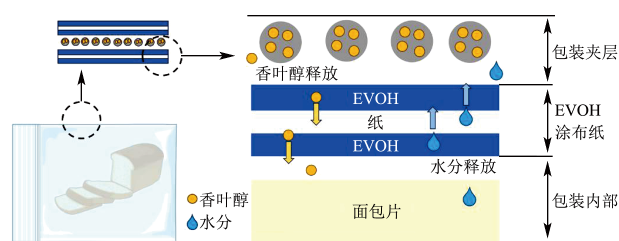


图 3 香叶醇在含有 EVOH 涂层的保鲜纸中的定向扩散  
Fig.3 Directional diffusion of geraniol in cling paper containing EVOH coating

除 EVOH 外, 也有研究者将环糊精包合物 (CD-IC), 作为湿度响应材料应用于食品包装中。当 RH 超过 85% 时, CD-IC 结构会被解离<sup>[37]</sup>, 其包裹的抑菌物质被释放, 达到湿度控制释放的效果。Qin 等<sup>[38]</sup>采用沉淀法制备了花椒精油 / $\beta$ -环糊精包合物 ( $\beta$ /ZBEO-CD-ICs), 其结构如图 4 所示。在湿度提高的情况下, 包合物中的花椒精油释放量明显增加, 呈现明显的温度响应性。

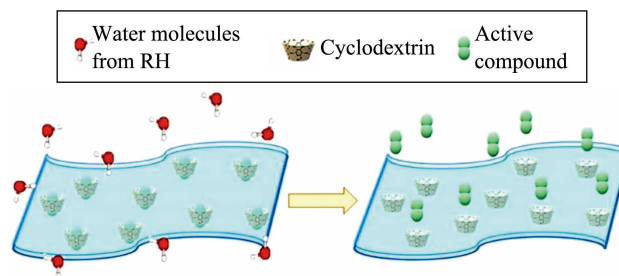


图 4  $\beta$ -IC 中包埋的活性物质在湿度增高后释放  
Fig.4 Release of active substances embedded in  $\beta$ -IC upon humidity increase

## 1.2 化学响应

### 1.2.1 pH值响应

水产类、肉类、乳制品等食品, 因为其较高的

水分活度和丰富的营养成分, 极易受到微生物的污染。且自身脂质容易发生氧化, 产生含硫化合物、总挥发性盐基氮、CO<sub>2</sub> 等挥发性有机物, 导致食品周围环境的 pH 值上升<sup>[39-41]</sup>。为实时监控包装内的 pH 值变化, 并对食品品质劣变进行干预, 越来越多 pH 值响应型包装得到了研发。

pH 值响应型包装以信息响应式包装居多, 如添加了天然色素的 pH 值响应标签、塑料膜等, 能对食品 pH 值的变化作出及时的指示<sup>[42]</sup>。天然色素也是 pH 值响应材料之一<sup>[41]</sup>。如花青素<sup>[43]</sup>、姜黄素<sup>[44]</sup>、叶绿素<sup>[45]</sup>等天然色素的结构在 pH 值改变时发生变化, 从而导致颜色变化。因其具有良好的食品安全性, 所以被广泛应用到食品响应式包装中。除天然色素外, 还有别的天然响应聚合物, 如海藻酸、羧甲基纤维素等<sup>[46]</sup>, 被应用到 pH 值响应材料中, 其结构式如图 5 所示。

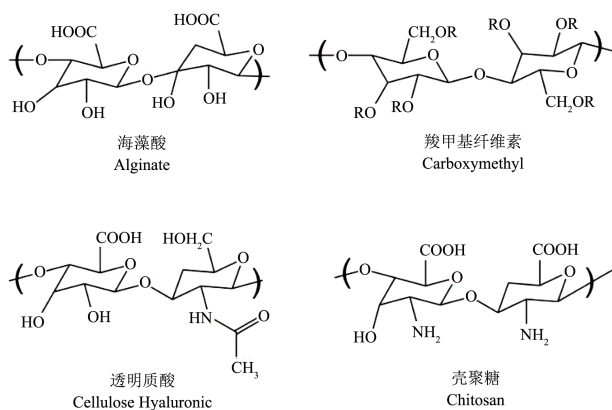


图 5 常见天然 pH 响应聚合物的结构

Fig.5 Structures of common natural pH-responsive polymers

Alpaslan 等<sup>[47]</sup>以 N, N-二甲基丙烯酰胺 (DMA)、明胶、柠檬酸 (CA) 和富含花色苷的石榴提取物 (PE) 为原料, 合成了一种新型的智能多功能水凝胶 (MFH), 能在 pH 值为 2-12 的范围内对 pH 的变化产生明显的颜色反应。Wang 等<sup>[49]</sup>把茜素 (AI) 修饰的 pH 值响应型植物染料 2-烯丙氧基-1-羟基-蒽醌 (AhAQ) 通过点击聚合接枝到薄膜上, 得到一种新型 pH 值响应型智能薄膜 (AhAQF)。和传统的天然色素制成的 pH 值响应膜相比, AhAQ 能通过共价键和薄膜牢固结合, 解决了天然色素响应膜中色素迁移的问题。且该种薄膜在氨蒸气作用下变为红色, 在挥发的醋酸条件下恢复黄色, 具有较强的可逆性和 pH 值响应性。

此外, 也有研究者将 pH 值响应材料应用到食品包装中, 研发了可对食品品质的劣变作出及时

的补救的 pH 值响应型食品包装。Li 等<sup>[49]</sup>研发了一种包埋了抑菌物质肉桂醛 (Cin), 由相反电荷的聚电解质聚烯丙基胺盐酸盐 (PAH) 和带负电荷的聚苯磺酸盐 (PSS) 封装的金纳米管材料 Cin-HNTs-PAH-PSS, 并将其应用于小麦面条的保鲜中。研究表明, 该种复合材料在酸性环境下, 由于聚电解质的静电相互作用, 肉桂醛的释放量远高于中性和碱性环境。在保鲜实验中, Cin-HNTs-PAH-PSS 能有效保持面条的感官条件, 显著延长了面条的货架期。Cui 等<sup>[50]</sup>以苹果酸为交联剂, 以瓜尔豆胶 (GG)、石斛多糖 (DP) 和聚乙烯醇 (PVA) 作为单体, 以植醇作为抑菌物质, 合成了 pH 值响应抑菌水凝胶。该水凝胶在弱酸性条件下, 植醇的释放与 pH 值呈负相关。在碱性条件下, 植醇的释放量与 pH 值呈正相关。在 pH 值为 5.5 和 8.0 时, 植醇的释放量达到了最大值, 能可控地对抑菌物质进行释放。

### 1.2.2 挥发性硫化物响应

水产品、牛肉等含硫量较高的食物, 在变质的过程中, 由于蛋白质的分解, 会产生大量挥发性含硫化合物, 包括硫化氢、硫醇和硫醚等。这些硫化物被认为是评估牛肉新鲜度的重要化合物之一<sup>[51]</sup>。目前应用在食品包装上的挥发性硫化物响应包装主要为响应比色传感器<sup>[52,53]</sup>。食品腐败生成的 H<sub>2</sub>S 气体与附着在包装上的指示剂发生变色反应, 并以此判定食品的腐坏程度。虽然响应比色操作方便, 但对环境湿度敏感, 且在较高浓度的 H<sub>2</sub>S 条件下才有明显的颜色转变, 无法对早期的食品腐败进行检测<sup>[54]</sup>。且响应比色中颜色的判断具有主观性<sup>[55]</sup>, 存在较大的偏差。因此, 关于挥发性硫化物响应材料的研究正在往提高材料敏感度、抗干扰性和简化制作流程等方向发展。

Teymouri 等<sup>[56]</sup>开发了一种基于铜纳米颗粒 (CuNPs) 的比色指示剂。Cu 能与硫化物形成强结合, 且不受湿度温度等条件干扰, 所以该指示剂对 H<sub>2</sub>S 具有灵敏且不可逆的响应。该指示剂的比色指标中的白色、黄色和棕色分别与新鲜、半新鲜和变质的新鲜度一一对应, 具有出色的指示性。其极低检测限 (1.53 μg/mL) 和定量限 (4.63 μg/mL) 显示出较高的指示剂灵敏度。Sun 等<sup>[57]</sup>研发出一种带有硅量子点 (SiQD) 和银纳米团簇 (AgNC) 配合物 (SiQD-AgNC) 的聚偏氟乙烯 (PVDF) 薄膜。当 SiQD-AgNC 配合物暴露于挥发性硫化物中时, 利用 SiQD 和 AgNC 之间形成的荧光共振能量转移

(FRET) 效应, SiQD-AgNC 配合物呈现紫红色至青色荧光的颜色变化, 易于分辨。Jaiswal 等<sup>[58]</sup>利用绿色方法合成的氧化铈纳米棒制作了一种可逆的、灵敏的和选择性的 H<sub>2</sub>S 气体传感器。在室温下具有 H<sub>2</sub>S 气体环境中, 纳米棒由白色变为棕色。当暴露在 1~50 ppm 的 H<sub>2</sub>S 环境中时, 通过 300 °C 加热 180 s 即可恢复为白色, 可持续使用。

### 1.3 生物响应

微生物污染是食品品质劣变的主要因素。为了提高效率, 研究者们研发了能直接对微生物进行生物响应的包装材料。不同的微生物会分泌不同种类的酶, 如果胶酶、纤维素酶等, 将酶对应的分解物质整合到材料中, 酶可以选择性地裂解酶敏感的连接或将特定的生物聚合物分解为亚单位单体, 导致聚合物的解体, 从而触发活性物质的释放<sup>[59]</sup>, 从而起到生物响应性抑菌的效果。基于酶释放控制的智能包装的控释机理可分为三种类型: (1) 对酶敏感聚合物的降解。当聚合物材料与特定的酶接触时, 对酶敏感的部分被降解; (2) 聚合物链段接枝上具有酶敏感的结构; (3) 活性物质通过与聚合物接枝形成酶敏感键, 在酶的作用下, 酶敏感的键被破坏, 从而允许包埋或接枝的活性物质的释放<sup>[59]</sup>。

Konstantin 等<sup>[60]</sup>使用羧甲基纤维素 (CMC) 作

为纤维素酶的底物, 聚半乳糖醛酸酯 (PGA) 作为果胶酶的底物, 以茜素作为标示物, 通过化学聚合得到生物响应水凝胶。研究表明, 该种水凝胶能对黑曲霉和表皮木霉和枯草芽孢杆菌的感染能触发茜素的释放。Min 等<sup>[61]</sup>基于酶水解原理制备了一种响应果胶酶刺激的抗菌纳米纤维膜, 并在测试了其应用在柑橘上的保鲜性能。实验证明, 该膜能特异性识别黑曲霉, 并准确地释放百里香酚抑制黑曲霉生长。

虽然该种酶响应包装具有较强的专一性和高效性, 但是酶在一定的温度和湿度下才具有较高的活性<sup>[62]</sup>, 对于在低温条件下运输和储存的食品如冰鲜肉等, 由于使用温度过低, 酶活性较低, 包装的使用效果不明显。此外, 水分活度较低的食物, 由于酶合成较少, 也会释放较少的活性物质来抑制微生物的生长。因此, 从这个角度来看, 酶响应包装并不适用于所有类型的食品<sup>[63]</sup>。

### 1.4 多响应

食品腐败受多种因素的影响, 因此开发具有多响应性的食品包装材料具有极大的实用意义。如表不所示, 为了使材料对多种因素具有响应型, 研究者们通过表面聚合、静电纺丝<sup>[64-66]</sup>等手段组合起来, 使复合材料能同时对不同的因素作出响应, 实现对不同储藏条件变化的快速应对。

表 1 近五年关于多响应食品包装材料的部分文献列表

Table 1 Selected list of literature on multi-responsive food packaging materials in the last five years

| 响应种类          | 材料种类  | 活性物质            | 制备方法       | 文献   |
|---------------|---|-----------------|------------|------|
| 温度、pH 值       | 小麦秸秆、阳离子改性聚 (N-异丙基丙烯酰胺-共丙烯酰胺) (CPNIPAM-AM)                                | 纳他霉素            | 自由基聚合      | [73] |
| 酶、湿度          | 纤维素纳米晶 (CNCS)、玉米醇溶蛋白、环糊精包合物 (CD-IC)                                       | 百里香酚、山梨酸、乳酸链球菌肽 | 静电纺丝       | [74] |
| 酶、湿度          | $\beta$ -环糊精 ( $\beta$ -IC)、酪蛋白 (CS)                                      | 百里香酚            | 静电纺丝       | [72] |
| 温度、pH 值、盐离子浓度 | 聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM)、壳聚糖  | 百里香酚            | 自由基聚合、静电吸附 | [17] |
| 温度、湿度         | 纤维素纳米晶 (CNCs)、聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM)、水性聚氨酯 (WPU)、碳纳米管                       | —               | 自由基聚合      | [68] |
| 温度、pH 值       | 瓜尔豆胶 (GG)、石斛多糖 (DP)、聚乙烯醇 (PVA)  | 植醇              | 化学交联法      | [50] |
| 温度、电          | 聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM)、聚 (3, 4-乙烯二氧基噻吩基): 聚 (苯乙烯磺酸) PEDOT: PSS、聚碳酸亚丙酯 (PPC) | 肉桂精油            | 自由基聚合、静电纺丝 | [18] |
| 温度、pH 值、盐离子   | 聚 N-异丙基丙烯酰胺 (PNIPAM)、聚 N-叔丁基丙烯酰胺 (PBAM)、聚丙烯酸 (PAA)                        | 麝香草酚            | 自由基聚合      | [75] |
| 酶、pH 值        | 聚乳酸 (PLA) 纳米纤维、壳聚糖低聚糖 (COS)、二醛淀粉 (DAS)                                    | 麝香草酚            | 化学接枝、静电纺丝  | [76] |
| pH 值、电        | 聚 (羧甲基-3,4-乙烯二氧噻吩) (PHEDOT)、聚丙烯酸 (PAA)                                    | 左氧氟沙星           | 等离子聚合、涂覆   | [77] |



表面聚合是指通过在聚合物大分子链上通过化学键结合适当的支链或功能性侧基的反应,从而实现了对聚合物改性或增加相应功能的效果<sup>[67]</sup>。通过接枝可以将带有响应性的结构或特定基团与其他高分子材料结合,从而制造具有单一响应性或多响应的材料。Sui等<sup>[68]</sup>通过将PNIPAM聚合到碳纳米棒上,同时结合水性聚氨酯(WPU)乳液的共同组装来制备一种新型多响应性光学膜。接枝PNIPAM后,使纳米复合膜除弹性WPU则具有柔韧性和润湿性和CNC具有湿度响应性外,还增加了温度敏感性。

静电纺丝是目前用途广泛、操作简便的纳米纤维制备方法,用高压静电将聚合物溶液或熔融体喷射成纳米纤维的技术<sup>[69]</sup>。制备多响应型纳米纤维的方法可以大致分为两种,可直接加入响应性材料,利用静电纺丝法制备具有多响应型的纳米纤维,也可利用对纳米纤维进行表面改性来制备多响应性的纳米纤维<sup>[70]</sup>。Aytac等<sup>[71]</sup>以纤维素纳米晶(CNCS)、玉米醇溶蛋白和淀粉与天然抗菌剂(百里香油、柠檬酸和乳链菌素等)及其关联CD-IC为原料,使用静电纺丝技术,开发了具有酶和湿度双重响应抗菌电纺纤维。该纤维在高湿度(95% RH)下释放速率加快,且对大肠杆菌、李斯特菌和真菌烟曲霉菌分泌的酶具有较高的灵敏度。Dai等<sup>[72]</sup>使用静电纺丝技术制作了以酪蛋白和聚环氧乙烷为基底,添加百里香酚和 $\beta$ -环糊精( $\beta$ -CD)包合物(THY/ $\beta$ -CD-IC)的酶和湿度双重响应纳米纤维。结果表明,基于酪蛋白的纳米纤维可以通过酪蛋白对细菌蛋白酶的来实现百里香酚的可控释放,从而在特定的应用中获得增强的抗菌活性。

## 2 刺激响应型食品包装面临的问题

随着技术的进步,刺激响应型食品包装得到了更多的研究,取得了一定的科技成果和进步,具有广阔的应用前景。但关于刺激响应型食品包装的研究研究仍处于起步阶段,具有许多不完善的地方。在将来,响应型食品包装的研发和应用仍面临着多方面的挑战。

### 2.1 响应效果和时效性

探索响应技术准确性和敏感度是研发响应性食品包装的重点<sup>[78]</sup>。刺激响应型材料的敏感度很大程度上决定了包装能否准确地释放出符合预期的活性物质。若活性物质释放过快,则很难实现对包装内

细菌的长效抑制;若活性物质释放滞后,或释放过少,则无法达到理想的抑菌效果,甚至会加剧食品的腐坏<sup>[79]</sup>。因此,为了保证响应型食品包装的保鲜效果,需根据目标食品的特点选择合适的响应种类的效果。

### 2.2 生产及成本

对于大多数食品来说,包装成本不应超过总成本的10%<sup>[80]</sup>,响应型食品包装采用了创新的响应材料,包装成本将不可避免地增加。一方面,刺激响应型包装材料,如PINPAM和MOF等材料价格较为昂贵,且刺激响应型纳米载体的制备过程复杂繁琐,也可能会增加制造成本<sup>[81]</sup>。除此之外,响应型材料的制备相对比较复杂,因此响应型食品包装的研究基本上停留在实验阶段,生产响应型食品包装的公司十分有限。而要实现响应型食品包装的工业化生产,就必须将响应型材料生产和现有的食品包装生产链进行整合,这无疑也是一个巨大的挑战。

### 2.3 消费者

与常规的食品包装相比,消费者对响应型食品包装并不熟悉,而且由于加入了新的生产工艺,产品的单价可能还会有一定程度的提升,可能会引发消费者的抵触情绪<sup>[81]</sup>。有研究表明,消费者们更倾向于选择没有气味的食品包装,而响应式包装为了具有抑菌性,通常会加入具有明显气味的活性抑菌物质,可能会影响到消费者的选择<sup>[82]</sup>。除此之外,消费者对活性包装的接受可能还与年龄、教育程度、家庭规模、收入等因素有关<sup>[83]</sup>。

### 2.4 材料安全性

为使响应型食品包装具有响应性,通常会在其中加入响应型材料。上述提到的化学合成的响应材料,如PNIPAM、DMA等,在合成时可能残留有毒单体,而通过常规的手段难以除去,可能会对食品安全和质量构成潜在威胁<sup>[84]</sup>。为了避免包装毒性和交叉污染等问题,选用绿色无毒、天然来源的材料如壳聚糖、海藻酸钠、蛋白质等已被应用于生物基食品包装材料已成为主流<sup>[85]</sup>。如果将刺激响应技术与生物基包装材料相结合,将在一定程度上推动食品包装向智能化、安全化方向发展。

### 2.5 法律法规

响应型食品包装能有效地改善食品的保鲜效果,但其商业应用仍受到法律法规的限制。欧洲

食品安全局 (EFSA) 于 2009 年制定的 (EC) 第 450/2009 号条例, 首次允许在食品中使用主动和智能包装, 但前提是该种包装可以提高食品的安全性、质量和延长保质期<sup>[86]</sup>。为了评估响应式食品包装的安全性, 应建立和完善相关法律和测试标准, 使该种包装生产规范化、安全化<sup>[87]</sup>。

### 3 结论

在过去几年的研究中, 从材料、制备手段和原理等方面看, 响应型食品包装呈现多元化的发展趋势。首先, 常用于生物、医药等其他领域的材料 (如 PNIPAM、离子液体、金属有机框架) 被应用于食品包装上, 为响应型包装材料的选择提供了新的思路。其次, 结合静电纺丝和表面聚合封装等手段, 将不同响应性的材料进行整合, 丰富了响应型食品包装的制备手段。除此之外, 响应型包装的响应原理不再局限于简单的变色响应, 将材料的静电相互作用、荧光共振转移、酶与底物的特异性识别等原理应用于响应型材料的触发机理上, 为响应型食品包装的研究和发展提供了多种路径。

### 4 未来展望

近年来, 根据消费者和监管机构日益增长的需求, 响应型食品包装得到了越来越多的关注, 相关研究常见报道。但现有的响应型食品包装仍面临着许多问题, 如响应效果不稳定、材料安全性难以保证、材料成本较高、工业化生产难度大等问题。针对以上问题, 研发的方向应逐渐往高响应性、绿色安全、可循环利、易于工业化生产用等方向发展。可预见的是, 在未来 10 年, 响应式包装市场将稳步增长, 同时也会对食品工业许多方面产生巨大的影响, 如减少食品腐败和浪费、食品召回和食源性疾病爆发等, 有较大的发展潜力。除食品工业外, 响应性食品包装的发展预计还将对市场其他部分, 如纸张、塑料和生物塑料等工业产生较大的影响。

### 参考文献

- [1] SANGHA H, ROY P K, HOSSAIN M I, et al. COVID-19 pandemic crisis and food safety: Implications and inactivation strategies [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 25-36.
- [2] MARYAM Z J, POLLY E B, FRANCESCO C, et al. A vision on the 'foodture' role of dietary exposure sciences in the

interplay between food safety and nutrition [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 120: 288-300.

- [3] HAN J W, LUIS R G, QIAN J P, et al. Food packaging: A comprehensive review and future trends [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(4): 860-877.
- [4] REGIANE R, MARIANA A, NATHÁLIA R D M, et al. Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 61: 132-140.
- [5] MEENU N, SRAVANTHI L, RAVI B, et al. UV protective poly (lactic acid) / rosin films for sustainable packaging [J]. Int J Biol Macromol, 2017, 99: 37-45.
- [6] JANJARASSKUL T, SUPPAKUL P. Active and intelligent packaging: The indication of quality and safety [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2018, 58(5): 808-831.
- [7] BROCKGREITENS J, ABBAS A. Responsive food packaging: recent progress and technological prospects [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2016, 15(1): 3-15.
- [8] TAWFIK A S, GANJAR F, ENDANG C. Smart advanced responsive materials, synthesis methods and classifications: from Lab to applications [J]. Journal of Polymer Research, 2021, 28(6): 1-15.
- [9] ZHANG X, GUO M, ISMAIL B B, et al. Informative and corrective responsive packaging: Advances in farm-to-fork monitoring and remediation of food quality and safety [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2021, 20(5): 5258-5282.
- [10] ANDREA D, ANDREA E, SIMONE B, et al. Intelligent packaging for real-time monitoring of food-quality: current and future developments [J]. Applied Sciences, 2021, 11(8): 3532.
- [11] AMIN M K, SEYED M B H, SARA L. Antimicrobial agents and packaging systems in antimicrobial active food packaging: An overview of approaches and interactions [J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 111: 1-19.
- [12] 梁红, 刘宝林. 温度波动对冷藏运输食品品质的影响 [C] // 中国制冷学会, 国内贸易工程设计研究院. 第九届全国食品冷藏链大会暨第六届全国冷冻冷藏产业创新发展年会论文集. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 2014: 4.
- [13] GANDHI A, PAUL A, SEN S O, et al. Studies on thermoresponsive polymers: Phase behaviour, drug delivery and biomedical applications [J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences, 2015, 10(2): 99-107.
- [14] SHAGHALEH H, HAMOUD Y A, XU X, et al. Thermo-/pH-responsive preservative delivery based on TEMPO cellulose nanofiber/cationic copolymer hydrogel film in fruit packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1911-1924.
- [15] WANG S, LIU H, WU D, et al. Temperature and pH dual-stimuli-responsive phase-change microcapsules for



- multipurpose applications in smart drug delivery [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 583: 470-486.
- [16] RAGHUWANSHI V S, JORAM M D, BROWNE C, et al. Effect of temperature on the conformation and functionality of poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM)-grafted nanocellulose hydrogels [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2023, 652(Pt B): 1609-1619.
- [17] LI W, ZHAO Y, SUN W, et al. Multi-responsive poly N-isopropylacrylamide/poly N-tert-butylacrylamide nanocomposite hydrogel with the ability to be adsorbed on the chitosan film as an active antibacterial material [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 208: 1019-1028.
- [18] DOUAKI A, TRAN T N, SUARATO G, et al. Thermo-responsive nanofibers for on-demand biocompound delivery platform [J]. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland : 1996)*, 2022, 445: 136744.
- [19] BI S, FENG C, WANG M, et al. Temperature responsive self-assembled hydroxybutyl chitosan nanohydrogel based on homogeneous reaction for smart window [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 229: 115557.
- [20] ZAMPINO D C, CLARIZIA G, BERNARDO P. Temperature responsive copolymers films of polyether and bio-based polyamide loaded with imidazolium ionic liquids for smart packaging applications [J]. *Polymers*, 2023, 15(5): 1147.
- [21] KARZARJEDDI M, ISMAIL M Y, ANTTI SIRVIÖ J, et al. Adjustable hydro-thermochromic green nanofoams and films obtained from shapable hybrids of cellulose nanofibrils and ionic liquids for smart packaging [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 443: 136369.
- [22] VALENOTINA M, PIERFRANCESCO C, MARTA G, et al. Light-responsive polymer Micro- and Nano-capsules [J]. *Polymers*, 2017, 9(1): 8.
- [23] YANG B, CHEN Y, SHI J. Reactive Oxygen Species (ROS)-based nanomedicine [J]. *Chemical Reviews*, 2019, 119(8): 4881-4985.
- [24] SHI H, FAN J, ZHAO Y, et al. Visible light driven  $\text{CuBi}_2\text{O}_4 / \text{Bi}_2\text{MoO}_6$  p-n heterojunction with enhanced photocatalytic inactivation of *E. coli* and mechanism insight [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 381(5): 121006.
- [25] CHEN L, XIE X, SONG X, et al. Photocatalytic degradation of ethylene in cold storage using the nanocomposite photocatalyst MIL101(Fe)- $\text{TiO}_2$ -rGO [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 424: 130407.
- [26] WANG M, NIAN L, WU J, et al. Visible light-responsive chitosan/sodium alginate/QDs@ZIF-8 nanocomposite films with antibacterial and ethylene scavenging performance for kiwifruit preservation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 1-13.
- [27] NI Y, SHI S, LI M, et al. Visible light responsive, self-activated bionanocomposite films with sustained antimicrobial activity for food packaging [J]. *Food Chemistry*, 2021, 362(15): 1-11.
- [28] 张潇天, 裘珂俊, 戚栋明, 等. 光控释放精油微胶囊的制备及其抗菌性能 [J]. *浙江理工大学学报(自然科学)*, 2023, 49(5): 566-573.
- [29] VALENOTINA M, PIERFRANCESCO C, COSIMO C, et al. Photo-responsive polymer nanocapsules [J]. *Polymer (Guilford)*, 2015, 70: 222-230.
- [30] VALENOTINA M, VALENOTINA B, VERONICA A, et al. Light-Responsive nanocapsule-coated polymer films for antimicrobial active packaging [J]. *Polymers*, 2019, 11(1): 68.
- [31] VALENOTINA M, VALENOTINA B, ADRIANA D L, et al. Essential oils as solvents and core materials for the preparation of photo-responsive polymer nanocapsules [J]. *Nano Research*, 2018, 11(5): 2783-2795.
- [32] 熊金梁, 陈爱强, 刘婧, 等. 典型电商运输包装对猕猴桃运输微环境及贮藏品质的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 218-224.
- [33] SOMAYEH H, BIBI MARZIEH R, RAZIEH N, et al. Antimicrobial, mechanical, and physicochemical properties of ethylene vinyl alcohol (EVOH) extruded films blended with propolis [J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 2020-2032.
- [34] ALEJANDRO A, RAQUEL H, MIRIAM G, et al. Hot-melt-extruded active films prepared from EVOH/trans-cinnamaldehyde blends intended for food packaging applications [J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1591.
- [35] ZHANG W, LIU R, SUN X, et al. Leaf-stomata-inspired packaging nanofibers with humidity-triggered thymol release based on thymol/EVOH coaxial electrospinning [J]. *Food Research International*, 2022, 162(Pt B): 112093.
- [36] NAWADON P, PHISUT N, KAMONCHAI C, et al. Controlled release antimicrobial sachet prepared from poly(butylene succinate)/geraniol and ethylene vinyl alcohol coated paper for bread shelf-life extension application [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 189: 251-261.
- [37] ABHISHEK G, SOPHIE M B, SAM S, et al. Synthesis of silver nanoparticles using curcumin-cyclodextrins loaded into bacterial cellulose-based hydrogels for wound dressing applications [J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(5): 1802-1811.
- [38] QIN Z, ZOU Y, ZHANG Y, et al. Electrospun pullulan nanofiber loading zanthoxylum bungeanum essential oil/ $\beta$ -cyclodextrin inclusion complexes for active packaging [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 210: 465-474.
- [39] ALAA E D A B, STEPHEN G G, BENJAMIN W B H, et al. Total volatile basic nitrogen and trimethylamine in muscle foods: Potential formation pathways and effects on human

- health [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 3620-3666.
- [40] SONG X, ELENA C, CRISTINA N. Screening of volatile decay markers of minced pork by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and chemometrics [J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128341.
- [41] 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.
- [42] BELEN G, FRANCISCO J R, M LOURDES G, et al. Application of differential colorimetry to evaluate anthocyanin-flavonol-flavanol ternary copigmentation interactions in model solutions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(35): 7645-7653.
- [43] NAZILA O, ABDORREZA M N, MEHRAN G, et al. Natural anthocyanins: Sources, extraction, characterization, and suitability for smart packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100872.
- [44] NEDA A, MORTEZA F, ZAHRA E. Curcumin: A promising bioactive agent for application in food packaging systems [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105520.
- [45] SONA C, SAJAD P, FOROUGH M. Sesame oil oxidation control by active and smart packaging system using wheat gluten/chlorophyll film to increase shelf life and detecting expiration date [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2020, 122(3): 1-12.
- [46] FABRICE O, MOHAMAD T, NOUREDDINE L, et al. pH-sensitive polymers: Classification and some fine potential applications [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(4): 1455-1484.
- [47] DUYGU A, TUBA ERŞEN D, NURETTIN, et al. Synthesis and preparation of responsive poly (Dimethyl acrylamide/gelatin and pomegranate extract) as a novel food packaging material [J]. *Materials Science & Engineering C*, 2020, 108: 110339.
- [48] WANG Y, JIN Z, ZHANG Z, et al. pH-responsive polymer films based on click polymerization for food freshness monitoring: non-toxic, non-leaking, and antibacterial [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(28): 33998-34007.
- [49] LI Q, REN T, PHIL P. The development and application of nanocomposites with pH-sensitive “gates” to control the release of active agents: Extending the shelf-life of fresh wheat noodles [J]. *Food Control*, 2022, 132: 108563.
- [50] CUI F, XI L, WANG D, et al. High-release, residue-free polysaccharide hydrogel for refrigerated food preservation [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(4): 6035-6046.
- [51] YANG Y, LI J, XING J, et al. Untargeted profiling and differentiation of volatiles in varieties of meat using GC orbitrap MS [J]. *Foods*, 2022, 11(24): 3997.
- [52] 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.
- [53] YANG X, LU X, WANG J, et al. Near-infrared fluorescent probe with a large Stokes shift for detection of hydrogen sulfide in food spoilage, living cells, and zebrafish [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(9): 3047-3055.
- [54] LI H, GENG W, SUN X, et al. Fabricating a nano-bionic sensor for rapid detection of H<sub>2</sub>S during pork spoilage using Ru NPs modulated catalytic hydrogenation conversion [J]. *Meat Science*, 2021, 177(1): 108507.
- [55] PEREIRA P F M, de SOUSA PICCIANI P H, CALADO V, et al. Electrical gas sensors for meat freshness assessment and quality monitoring: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 36-44.
- [56] TEYMOURI Z, SHEKARCHIZADEH H. A colorimetric indicator based on copper nanoparticles for volatile sulfur compounds to monitor fish spoilage in intelligent packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 33: 100884.
- [57] SUN Y, ZHAI X, ZOU X, et al. A ratiometric fluorescent sensor based on silicon quantum dots and silver nanoclusters for beef freshness monitoring [J]. *Foods*, 2023, 12(7): 1464.
- [58] JAISWAL M, KUMAR R, TRIPATHI R M, et al. Rapid and reversible detection of trace amounts of H<sub>2</sub>S in air and packaged food using a biogenic bismuth oxide nanorod colorimetric sensor [J]. *Sensors and Actuators B-chemical*, 2023, 381: 133395.
- [59] ATEFE R, FATEMEH R, SAFOURA A, et al. Release of bioactive compounds from delivery systems by stimuli-responsive approaches; triggering factors, mechanisms, and applications [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 307: 102728.
- [60] KONSTANTIN P S, EVA W, STEPHEN J E, et al. Bioresponsive systems based on crosslinked polysaccharide hydrogels [J]. *Process Biochemistry*, 2012, 47(2): 305-311.
- [61] MIN T, ZHOU L, SUN X, et al. Enzyme-responsive food packaging system based on pectin-coated poly (lactic acid) nanofiber films for controlled release of thymol [J]. *Food Res Int*, 2022, 157: 111256.
- [62] SHAO W, LIU H, WANG S, et al. Controlled release and antibacterial activity of tetracycline hydrochloride-loaded bacterial cellulose composite membranes [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 145: 114-120.
- [63] MARION B, SIMONA B, JOCELYNE B, et al. Systems for stimuli-controlled release: Materials and applications [J]. *J Control Release*, 2019, 294: 355-371.
- [64] MIN T, ZHOU L, SUN X, et al. Electrospun functional

- polymeric nanofibers for active food packaging: A review [J]. *Food Chemistry*, 2022, 391: 133239.
- [65] 冯坤,皇甫露露,相启森,等.静电纺丝技术在食品抗菌保鲜中的应用研究进展[J].*食品安全质量检测学报*,2022, 13(20):6554-6562.
- [66] 孙亚鹏,刘霄莹,李慧雪,等.静电纺丝纳米纤维在食品智能包装中的研究进展[J].*包装工程*,2023,44(13):93-102.
- [67] MUELLER M, BANDL C, KERN W. Surface-immobilized photoinitiators for light induced polymerization and coupling reactions [J]. *Polymers*, 2022, 14(3): 4030608.
- [68] SUI Y, LI X, CHANG W, et al. Multi-responsive nanocomposite membranes of cellulose nanocrystals and poly(N-isopropyl acrylamide) with tunable chiral nematic structures [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 232: 115778.
- [69] MIN T, ZHOU L, SUN X, et al. Electrospun functional polymeric nanofibers for active food packaging: A review [J]. *Food Chemistry*, 2022, 391(15): 133239.
- [70] MERCANTE L A, TEODORO K B R, SANTOS D M D, et al. Recent progress in stimuli-responsive antimicrobial electrospun nanofibers [J]. *Polymers*, 2023, 15(21).
- [71] ZEYNEPA, XU J, PILLAI S K R, et al. Enzyme- and relative humidity-responsive antimicrobial fibers for active food packaging [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(42): 50298-50308.
- [72] DAI J, HU W, YANG H, et al. Controlled release and antibacterial properties of PEO/casein nanofibers loaded with Thymol/ $\beta$ -cyclodextrin inclusion complexes in beef preservation [J]. *Food Chemistry*, 2022, 382: 132369.
- [73] SHAGHALEH H, HAMOUD Y A, XU X, et al. Thermo-/pH-responsive preservative delivery based on TEMPO cellulose nanofiber/cationic copolymer hydrogel film in fruit packaging [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 1911-1924.
- [74] AYTAC Z, XU J, RAMAN P S, et al. Enzyme- and relative humidity-responsive antimicrobial fibers for active food packaging[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(42): 50298-50308.
- [75] LI W, ZHAO Y, SUN W, et al. Multi-responsive poly N-isopropylacrylamide/poly N-tert-butylacrylamide nanocomposite hydrogel with the ability to be adsorbed on the chitosan film as an active antibacterial material [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 208: 1019-1028.
- [76] DU H, SUN X, BIAN X, et al. pH and amylase dual stimuli-responsive electrospinning membrane for smart releasing thymol to control melon *Rhizopus stolonifer* [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144473.
- [77] MOLINA B G, VASANI R B, JARVIS K L, et al. Dual pH- and electro-responsive antibiotic-loaded polymeric platforms for effective bacterial detection and elimination [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2022, 181: 105434.
- [78] HOU T, S M, WANG F, et al. A comprehensive review of intelligent controlled release antimicrobial packaging in food preservation [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2023, 32(11): 1459-1478.
- [79] CHEN X, CHEN M, XU C, et al. Critical review of controlled release packaging to improve food safety and quality [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(15): 2386-2399.
- [80] MASOUD G, CARLO A. C, GIULIA C, et al. An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 51: 1-11.
- [81] SCHAEFER D, WAI M C. Smart packaging: opportunities and challenges [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 72: 1022-1027.
- [82] 王浩,石蕊,刘畅,等.食品包装材质对消费者绿色购买意愿影响的眼动研究[J].*包装工程*,2023,44(13):55-62.
- [83] ANNA F, IRIS N, MIRJAM G. Does attention to health labels predict a healthy food choice? An eye-tracking study [J]. *Food Quality and Preference*, 2018, 69: 57-65.
- [84] 曹瑜,钟泽辉,唐聪.食品接触材料中有害物质迁移的研究进展[J].*包装工程*,2023,44(15):112-121.
- [85] 卢嘉敏.绿色可降解食品保鲜材料的研究进展[J].*包装工程*,2023,44(S2):77-81.
- [86] SELÇUK Y, BETTINA R, PETERSEN M K, et al. Active packaging applications for food [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(1): 165-199.
- [87] ANDREA D, ANDREA E, SIMONE B, et al. Intelligent packaging for real-time monitoring of food-quality: current and future developments [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3532.