

活性包装与智能包装在果蔬贮藏保鲜中的应用进展

刘涛¹, 李帅², 张海波², 孙秀兰¹, 叶永丽^{1*}

(1. 江南大学 食品科学与技术国家重点实验室, 食品学院, 食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏 无锡 214000; 2. 火星人厨具股份有限公司, 浙江 嘉兴 314400)

摘要: 包装是食品供应链的重要组成部分, 其不仅能降低果蔬贮藏、运输和销售过程中的损耗, 还能实时评估果蔬的品质变化。借助包装作为递送和指示载体, 已开发多种应用于果蔬贮藏的功能性包装, 在改善果蔬贮藏环境和监测果蔬质量中发挥着重要作用。该文总结活性包装和智能包装两类新型功能性包装在果蔬贮藏保鲜中的研究现状, 并对其应用性能进行对比分析, 对功能性果蔬包装未来的设计与应用进行展望, 以期新型果蔬包装的开发提供思路。

关键词: 功能性包装; 活性包装; 智能包装; 果蔬; 贮藏保鲜

Application Progress of Active Packaging and Intelligent Packaging in the Storage and Preservation of Fruits and Vegetables

LIU Tao¹, LI Shuai², ZHANG Haibo², SUN Xiulan¹, YE Yongli^{1*}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control, Jiangnan University, Wuxi 214000, Jiangsu, China; 2. Marsenger Kitchenware Co., Ltd., Jiaxing 314400, Zhejiang, China)

Abstract: Packaging constitutes a significant component in the food supply chain. The packaging not only lowers the loss of fruits and vegetables during storage, transportation, and marketing, but also evaluates the quality on a real-time basis. Packaging can be used as a delivery and indication carrier for active substances, and various functional packaging has been developed for storage. These packaging types are of great importance in improving the storage environment and monitoring the quality of fruits and vegetables. This paper summarized the current research status of two types of functional packaging (including active packaging and intelligent packaging) in the storage and preservation of fruits and vegetables, and carried a comparative analysis of the application performance of functional packaging. Finally, this paper anticipated the future development and implementation of functional packaging for fruits and vegetables. By providing insights and recommendations, this paper can provide ideas for developing novel packaging solutions.

Key words: functional packaging; active packaging; intelligent packaging; fruits and vegetables; storage and preservation

引文格式:

刘涛, 李帅, 张海波, 等. 活性包装与智能包装在果蔬贮藏保鲜中的应用进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 196-203.
LIU Tao, LI Shuai, ZHANG Haibo, et al. Application Progress of Active Packaging and Intelligent Packaging in the Storage and Preservation of Fruits and Vegetables[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 196-203.

果蔬是一类营养丰富的食物, 不仅能够为人们提供日常生活中必需的营养物质, 还能预防肥胖、糖尿

病、高血压和冠心病等多种慢性疾病^[1-2]。我国作为农业大国, 果蔬的产量以及消费总量均居世界前列。

基金项目: 云南省科技厅科技计划项目(202202AE090007); 科技人才与平台计划项目(202305AF150025)

作者简介: 刘涛(1997—), 男(汉), 博士研究生, 研究方向: 食品安全与质量控制。

*通信作者: 叶永丽(1990—), 女(汉), 助理研究员, 博士, 研究方向: 食品安全与质量控制。

然而,由于缺乏有效的贮藏保鲜方法,我国每年约有 1.3 亿 t 蔬菜和 1 200 万 t 水果在贮藏运输过程中发生腐败变质,损耗率占总量的 20%~30%^[3-4]。此外,误食腐败变质的果蔬会引起人体胃肠道功能紊乱,严重时可能造成人体脏器损伤。因此,开发有效的贮藏保鲜方法对于延长食品货架期、降低食物浪费和保障食品安全具有十分重要的意义。

食品包装是食品供应链的重要组成部分,对果蔬保鲜至关重要。有效的包装不仅降低了外部环境和机械损伤对果蔬质量造成的不良影响,还能减缓果蔬呼吸作用并控制果蔬水分流失和微生物生长。活性包装和智能包装是两类新型的功能性包装,其通过与果蔬的保鲜方法相结合,可延长果蔬货架期并实时监测果蔬质量变化^[5]。其中,活性包装利用包装内的活性物质进行果蔬贮藏环境的动态调节,来延长果蔬货架期^[6];智能包装则借助指示剂和传感器实时评估果蔬质量和贮藏环境变化,来提供果蔬的质量信息^[7-8]。

目前,智能包装和活性包装已在食品行业得到广泛应用。然而,除了极少数已经商品化的智能包装和活性包装外,许多研究仍处于实验室应用阶段,无法在实际场景中进行应用。因此,本文综述活性包装和智能包装在改善果蔬贮藏环境和监测果蔬质量变化中的最新研究进展,并分析其在实际应用中面临的挑战。同时,探讨新型果蔬包装技术未来的发展方向,以期以新型包装技术的开发提供参考和帮助。

1 活性包装在果蔬贮藏保鲜中的应用

2009 年,欧盟在发布的《食品接触性活性和智能

材料及物品新规》中将活性包装中与食品相互作用的包装系统定义为“人为添加的用于吸收包装内食物吸收及释放的或包装内环境中的物质”^[9],即借助包装作为活性物质的载体,改善食品贮藏环境,以延长果蔬货架期(图 1)。根据包装功能的不同,可将活性包装分为气体清除包装、抑菌包装和湿度调控包装等。

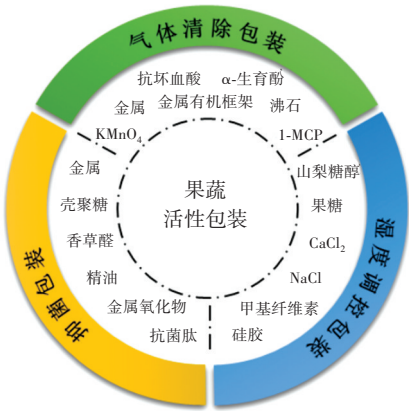


图 1 活性包装在果蔬贮藏保鲜中的应用
Fig.1 Application of active packaging in the storage and preservation of fruits and vegetables

1.1 气体清除包装

适宜的气体贮藏环境可降低果蔬呼吸作用、抑制果蔬表面微生物生长并减缓果蔬氧化进程^[10]。作为基于自发气调研发的新型气体调控策略,气体清除包装借助气体吸收剂或清除剂动态调节包装内的气体成分。气体清除包装在果蔬贮藏保鲜中的应用见表 1。

1.1.1 O₂ 清除包装

包装内 O₂ 含量过高时,会加剧食品的氧化和微生

表 1 气体清除包装在果蔬贮藏保鲜中的应用

Table 1 Application of gas scavenger packaging in the storage and preservation of fruits and vegetables

分类	活性物质	包装方式	应用	功能	参考文献
O ₂ 清除包装	纳米铁粉、聚丙烯酸钠	聚乳酸(poly lactic acid, PLA)托盘以及 PLA 膜	露露果	包装内 O ₂ 和 CO ₂ 浓度在 25 d 内稳定控制在 16.8% 和 5%	[11]
	Amosorb DFC 4020E®	食品级树脂聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET) PPK60	芒果	芒果在 4℃下贮藏 7 d,颜色变化减少了 32%~36%	[12]
	Oxygen Absorber Help Save® 邻苯三酚	低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)膜 LDPE 膜	杨桃 大蒜	减缓了杨桃贮藏期内的质量损失、颜色变化和抗坏血酸含量的降低,杨桃货架期延长至 30 d 降低大蒜贮藏期内的呼吸速率、质量减轻和微生物数量,大蒜货架期延长至 30 d	[13] [14]
CO ₂ 清除包装	EMCO-B	小袋包装	草莓	降低草莓糖代谢过程并维持草莓的感官品质,草莓货架期延长至 30 d	[15]
	碳酸钠和甘氨酸钠	琼脂膜	蘑菇	降低蘑菇贮藏期内颜色、硬度和风味等感官品质的损失	[16]
C ₂ H ₄ 清除包装	1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)	纸基	杏果	1-MCP 抑制 C ₂ H ₄ 的生成,延缓了杏果的成熟过程	[17]
	甲酸镁金属有机骨架	LDPE 膜	香蕉	金属有机骨架吸附了包装内的 C ₂ H ₄ ,延缓了香蕉的成熟过程	[18]
	KMnO ₄	Al ₂ O ₃ 纳米纤维膜	香蕉	KMnO ₄ 催化分解 C ₂ H ₄ ,提升了香蕉贮藏 14 d 后的感官品质	[19]
	浮岩、KMnO ₄	小袋包装	牛油果	浮岩吸附 C ₂ H ₄ ,KMnO ₄ 催化分解 C ₂ H ₄ ,将牛油果货架期延长了 7 d	[20]

物的生长^[21]。 O_2 清除包装借助氧清除剂(金属粉末、 α -生育酚、抗坏血酸和邻苯三酚等)与包装内 O_2 进行反应,以快速降低包装内 O_2 浓度,缩短气体平衡的时间^[22]。

铁粉是食品工业中应用最广泛的商业氧清除剂,具有价格低、使用简单和安全性高的优势。Escobar等^[11]将铁粉与聚丙烯酸钠粉末混合作为脱氧剂,发现其质量比为1:1时,包装内 O_2 和 CO_2 的浓度在25 d内稳定控制在16.8%和5%,将露露果的货架期延长至25 d。Nimitkeatkai等^[13]评估了商业 O_2 清除剂Oxygen Absorber Help Save®和 C_2H_4 清除剂Ethyl-GONE®对杨梅的保鲜效果,结果显示,该活性包装能缓解杨梅质量、颜色和抗坏血酸含量的降低,将杨梅的货架期延长至30 d。Singh等^[14]使用涂膜邻苯三酚的低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)薄膜用于去皮大蒜的包装,可将大蒜的货架期延长至30 d,显著降低大蒜贮藏期内的呼吸速率、质量和微生物数量。

1.1.2 CO_2 清除包装

高浓度的 CO_2 能抑制微生物生长,但同时也会引起果蔬酸化并加剧无氧呼吸作用,对果蔬的感官品产生不利影响。 CO_2 清除包装借助NaOH、KOH和CaO等活性物质来降低包装内 CO_2 的浓度,以改善果蔬贮藏环境^[23]。

Aday等^[15]研究了商业 CO_2 氧气清除剂EMCO-B($2Na_2CO_3 \cdot 3H_2O$ 、 Na_2CO_3 、NaCl和膨润土)对贮藏期内草莓质量的影响,结果表明,EMCO-B能显著降低草莓糖代谢过程并维持草莓的感官品质,将草莓货架期延长至30 d。为了简化包装步骤,Wang等^[16]使用琼脂作为基质、甘油作为增塑剂、碳酸钠和甘氨酸钠作为 CO_2 清除剂制备了一种用于蘑菇贮藏的包装膜,该薄膜可将包装内 CO_2 浓度控制在3%~4%,低于蘑菇贮藏5%的耐受限值。此外,该薄膜还能吸收包装内过量的水分,降低了蘑菇贮藏5 d后的颜色、硬度和风味等感官品质的损失。

1.1.3 C_2H_4 清除包装

C_2H_4 是一种具有催熟作用的挥发性气体,能够调节果蔬发育和成熟的过程。然而,高浓度的 C_2H_4 会导致果蔬过早成熟,甚至腐烂。据统计,由于 C_2H_4 过高导致的食物浪费占水果总产量的10%~80%^[24]。因此,清除包装内过量的 C_2H_4 对调控果蔬成熟、延长果蔬货架期十分重要。常用的 C_2H_4 清除物质可分为合成抑制剂、吸收剂和催化剂^[25-26]。

1-MCP是目前应用最广泛的 C_2H_4 抑制剂,能与 C_2H_4 竞争结合 C_2H_4 受体并抑制多个转录因子的表达^[27]。周嘉佳等^[17]将1-MCP、聚丙烯酸和乙基纤维素混合物涂抹在纸基材料上制备了1-MCP缓释包装纸,使用该包装纸不仅降低了杏果的呼吸作用,还能缓解

杏果硬度、可滴定酸和可溶性固形物含量的损失。沸石、活性炭和金属有机框架等是一类具有高比表面积的 C_2H_4 吸附材料,可将 C_2H_4 进行高效的吸附^[18]。然而,随着贮藏时间延长,吸附剂对 C_2H_4 的吸附效率可能会显著降低^[28]。与吸附剂相比, $KMnO_4$ 、 O_3 和ZnO等催化剂具有更高的 C_2H_4 清除能力^[29]。 Al_2O_3 纳米纤维膜对 $KMnO_4$ 具有高负载性能,以 Al_2O_3 纳米纤维膜负载 $KMnO_4$ 制备的 C_2H_4 清除包装膜,能在25 min内降解包装内73%的 C_2H_4 ,可延缓香蕉成熟过程^[19]。为进一步提升 $KMnO_4$ 的 C_2H_4 催化性能,Wang等^[20]利用 $KMnO_4$ 可催化分解吸附于浮岩表面的 C_2H_4 的特性,开发了一种同时具有吸附和催化作用的新型 C_2H_4 清除剂,可将牛油果每小时的 C_2H_4 和 CO_2 产量分别控制在0 $\mu L/kg$ 和25 $\mu L/kg$,使牛油果货架期延了7 d。然而, $KMnO_4$ 毒性较高不宜与食品直接接触。虽然将 $KMnO_4$ 与果蔬包装材料相结合能提升食品安全性,但会改变包装材料的颜色,影响消费者的消费欲望。因此,开发适合特定果蔬的乙烯清除包装薄膜,在提高乙烯清除性能同时,改善包装材料的理化性质,仍是未来研究的主要方向。

1.2 抑菌包装

抑菌包装以包装材料作为抑菌剂载体,通过缓慢释放抑菌剂,可实现对果蔬表面微生物的长效控制。抑菌包装常用抑菌剂按其成分不同可分为天然抑菌剂、有机抑菌剂和无机抑菌剂3类。

植物精油是从植物中提取的一种挥发性芳香物质,具有优良的抗菌抗氧化活性,已广泛应用在果蔬保鲜中^[30]。然而,传统的精油涂膜和熏蒸处理虽然操作简便,但其强烈的气味可能影响消费者的购买意愿^[31]。因此,需要将精油与微胶囊包埋、多层薄膜封装和静电纺丝技术相结合,以进一步提升精油的稳定性并掩盖气味^[32]。Shao等^[33]制备了肉桂精油微胶囊并将其与纸基材料相结合,制备了具有抑菌活性的肉桂精油缓释蘑菇包装纸。微胶囊系统的引入不仅降低了精油的气味,还能延长肉桂精油在纸基材料上的释放时间,改善了贮藏期内蘑菇的硬度,避免水分凝结加速蘑菇腐烂。有机抑菌剂价格低、抑菌性能较强,更适合在抑菌包装中进行大规模应用^[34]。壳聚糖(chitosan, CS)是一种安全和可降解的多糖物质,已广泛应用于新型食品包装材料的研发中^[35]。为了提升CS薄膜的机械和抗菌性能,Liu等^[36]使用了CS、聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)和多孔石墨氮化碳(graphitic carbon nitride, g- C_3N_4)制备了新型食品包装膜,PVA提升了CS薄膜的机械性能,多孔的g- C_3N_4 具有光催化活性杀菌剂,使用该包装薄膜可显著抑制草莓表面大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长,将草莓的货架期延长至96 h。此外,CS-PVA-g- C_3N_4 复合膜能够进行溶解再生,重生后的包

装薄膜的机械性能和抗菌性能并不会发生显著降低。与有机抑菌剂相比,无机抑菌剂安全性更高且不易产生耐药性。Jiang 等^[37]在研究海藻酸盐/纳米 Ag 涂抹处理对蘑菇保鲜效果的影响时发现,纳米 Ag 能抑制香菇表面酵母菌和霉菌的生长,降低了蘑菇的质量损失、质地软化和褐变程度。同样使用涂抹方式,Koushesh 等^[38]研究了 ZnO/羧基纤维素活性涂层对即食石榴贮藏保鲜的效果,涂层中的纳米 ZnO 显著降低石榴表面的酵母和霉菌的数量。与有机抑菌剂相比,使用无机抑菌剂的抑菌涂层对并不会对果蔬本身的口感和风味产生影响,使其更容易被消费者接受。然而,无机抑菌剂的抑菌效果会受到纳米颗粒形状、大小和浓度等因素的影响^[39]。因此,抑菌包装材料的配比和应用必须考虑不同的场景。

1.3 湿度调控包装

贮藏环境相对湿度较高时,不仅会加速腐败微生物的生长,还会影响果蔬感官品质。为克服传统果蔬包装膜水蒸气透过率较差的问题,湿度调控包装将吸湿剂以小袋包装、衬垫或托盘等形式添加至包装内,可实现高效的湿度调控功能。用于吸收包装内水分的吸湿剂按照成分不同可分为有机吸湿剂和无机吸湿剂两类。

果糖是糖类物质中吸湿性能最强的单糖,它在环境湿度相对湿度大于 55% 时开始吸收水分,并且能长时间保持吸湿性。研究人员在对比含有不同浓度果糖的果盘对草莓的保鲜效果时发现,果糖的添加量为 30% 时,果盘的吸湿性效果最佳,并且草莓在贮藏 5 d 后减重不到 0.9%,远低于 6% 的最低可接受度^[40]。无

机吸湿剂的吸湿能力更强,且具有较高的耐热性,更适合通过熔融挤压成型工艺添加至包装材料中。Rux 等^[41]制备的 3 层结构湿度调节托盘可减少包装内气体与外界环境发生气体交换,并阻止了吸湿剂向果蔬表面迁移,中间层添加 12% NaCl 时可将托盘的吸水量提高约 73%。然而,吸湿托盘在吸收水分时也加剧了果蔬水分的损失。因此,针对不同贮藏需求的果蔬仍需进一步优化吸湿剂的种类及浓度。

近年来,针对果蔬的不同特性开发了多种类型的活性包装,在维持果蔬感官品质和延长果蔬货架期中发挥着重要作用。将活性物质以小袋包装的形式添加至包装内,虽然能在短时间内调节果蔬贮藏环境,但存在误食和破损等安全隐患。将活性物质与包装材料相结合是解决该问题有效的方法,但两者兼容性较差。此外,目前已报道的许多活性包装存在成本高、稳定性差的问题,无法产业化应用。因此,在未来的发展中,如何提高包装材料的稳定性、降低包装成本和提升消费者的接受度,仍然是活性包装产业化亟待解决的问题。

2 智能包装在果蔬贮藏保鲜中的应用

智能包装是一种新兴的食品包装技术,可实时监测包装内果蔬的 pH 值、温/湿度、微生物代谢物和化学物质等指标,并将其转化为直观的颜色或数字信号,以提示消费者丢弃变质食品并减少食物浪费^[42-44]。根据包装功能的不同,可将智能包装分为新鲜度监测包装、气体监测包装和温度监测包装等,智能包装在果蔬贮藏保鲜中的应用见表 2。

表 2 智能包装在果蔬贮藏保鲜中的应用
Table 2 Application of intelligent packaging in the storage and preservation of fruits and vegetables

分类	方式	应用	功能	参考文献
新鲜度监测包装	标签	鲜切青椒	溴百里香酚蓝和甲基红响应 CO ₂ 浓度变化,指示鲜切青椒的新鲜度	[45]
	标签	苹果	甲基红感应乙醛浓度变化,指示苹果的新鲜度	[46]
	PLA/纳米纤维素膜	番茄	花青素响应 pH 值变化,指示番茄的新鲜度	[47]
	淀粉/明胶膜	金针菇	紫甘薯多酚提取物响应 pH 值变化,指示金针菇新鲜度	[48]
	标签	荔枝	同轴 3D 打印技术制备含有蓝莓花青素的指示标签,指示荔枝的新鲜度	[49]
成熟度监测包装	标签	牛油果	乙烯-乙烯醇共聚物响应 C ₂ H ₄ 浓度变化,借助标签颜色变化判断牛油果品质	[50]
	传感器	香蕉	三元异质结传感器在室温下监测 C ₂ H ₄ 浓度变化,监测香蕉成熟度	[51]
	CS 膜	猕猴桃	溴百里香酚蓝和甲基红响应挥发性醛浓度变化,指示猕猴桃成熟度	[52]
	淀粉膜	榴莲	溴百里香酚蓝和甲基红响应挥发性硫化物浓度变化,指示榴莲成熟度	[53]
温度监测包装	标签	水果	苯酚会在碳酸钠和过硫酸铵的存在下被氧化,通过 TTI 颜色变化,判断水果表面微生物的数量	[54]
	标签	猕猴桃、草莓和芒果	TTI 颜色变化预测了水果的重量损失、可溶性固形物、维生素 C 含量、可滴定酸度和抗氧化能力	[55]

2.1 新鲜度监测包装

在贮藏、运输和销售过程中,果蔬会因微生物生长和自身生理活动而失去新鲜度,同时包装内某些特征

物质(CO₂、有机酸、挥发性盐基氮和 H₂S 等)也会发生改变。通过监测这些物质在包装内的积累水平与 pH 值变化的关系,可准确判断果蔬的新鲜度。目前,智能

包装中用于响应 pH 值变化的主要是基于 pH 值敏感性染料(溴百里香酚蓝、溴酚蓝、甲基红、花青素和姜黄素等)^[43]。此类染料在感知 pH 值变化后能产生明显的颜色变化。

为了以非接触的方式监测果蔬的新鲜度,许多研究者开发了基于 pH 值敏感染料的新鲜度指示标签。Kim 等^[46]使用油墨打印机打印了用于监测苹果新鲜度的指示标签,该标签能够感应苹果释放的乙醛,通过标签上甲基化颜色的变化能够准确判断苹果的新鲜度。此外,3D 打印技术也可用于新鲜度指示标签的制备。Zhou 等^[49]使用同轴 3D 打印技术制备了一种多功能指示标签,其外壳为负载蓝莓花青素的纤维纳米纤维,内壳为 CS/1-MCP。使用该标签可将荔枝的保质期延长至 6 d,同时借助花青素的颜色变化能够精准指示荔枝的新鲜度。这种具有果蔬保鲜与新鲜度监测双功能 3D 打印指示标签,有望克服智能包装功能单一的不足,为开发多功能智能包装提供了新的思路。Zong 等^[48]将紫甘薯多酚提取物加载到淀粉/明胶薄膜中,开发了金针菇新鲜度监测的包装薄膜,随着金针菇贮藏时间的延长,薄膜的颜色由最初的绿色变为灰紫色,最后变为黄色。然而,包装薄膜直接与食品接触,使用未知安全水平的合成化合物可能会对消费者健康构成威胁^[56]。因此,在开发指示新鲜度的包装薄膜中应尽可能的考虑天然染料。

2.2 成熟度监测包装

成熟度监测包装是一种新型的食品包装,它采用指示标签、传感器等技术手段来监测果蔬的成熟度^[57]。此类包装可实时、非接触地测量包装内 C_2H_4 、挥发性醛、硫化物和颜色等变化,以帮助消费者了解水果的食用质量。

Iskandar 等^[50]使用乙烯-乙烯醇共聚物、甘油和钼酸铵制备了用于监测牛油成熟度的指示标签,该标签能感知牛油果成熟过程中释放的 C_2H_4 ,且标签颜色变化与果实品质下降之间具有较强的相关性。除了乙烯之外,许多果蔬成熟阶段释放的挥发性醛和硫化物也可用于指示果蔬的成熟度。其中,挥发性醛可用于猕猴桃^[52]、松露^[58]和水蜜桃^[59]的成熟度指标,而硫化物指标主要作为榴莲的成熟度指标^[53]。Ripesense®作为世界上首个商业化应用的水果成熟度指示标签,可感知梨成熟过程中释放的芳香化合物,通过指示标签的颜色变化以准确判断梨的成熟度。该设计与借助指示剂的智能包装相比,基于传感器的新鲜度监测包装能更加快速和灵敏判断果蔬的成熟度。Li 等^[51]研发了基于还原氧化石墨烯/二硒化钨/铂异质结的电阻型乙烯传感器,该三元异质结传感器在室温下对乙烯表现出更高的灵敏度和更快的 p 型响应,对 10 mg/L 乙烯的灵敏度为 0.001%,响应和恢复时间为 33 s 和 13 s,可精

准判断香蕉的成熟度。然而,传感器的使用无疑增加了包装的成本。因此,如设计简单便捷以及经济实惠的传感器,对未来传感器在智能包装中的大规模应用十分重要。

2.3 温度监测包装

食品在贮藏过程中的温度波动会显著影响果蔬的感官品质及营养价值,因此实时监测食品贮藏期间环境的温度变化对于判断食品的质量十分重要。传统的食品温度监测器只能对贮藏环境的温度进行整体检测,而温度监测包装能感知和记录单个食品温度的积累变化过程。时间温度指示剂(temperature-time integrator, TTI)是目前果蔬温度监测包装中应用最广泛的指示系统,除了能够用于感知和记录果蔬贮藏期内温度变化的历程,还能作为因温度波动而造成食品质量损失的指标。

TTI 发挥作用主要依赖于酶、机械和微生物等之间的反应,这些反应往往能够产生一系列不可逆的变化,从而判断果蔬贮藏期间的温度变化过程。目前,市场上已有许多成熟的 TTI 技术,主要有 Monitor Mark™、TimeStrip Plus TTI®和 Fresh-Check®等产品。在特定的贮藏温度下暴露一段时间后,指示器上的蓝色条带会从左向右迁移,肉眼观察蓝色条带的位置即可准确判断包装内食物的温度时间变化过程。除了借助 TTI 判断果蔬的温度时间变化过程,还能根据阿伦尼乌斯方程分别计算食品与 TTI 的活化能(activation energy, E_a),当两者之差的绝对值低于 25 kJ/mol 时,TTI 还能作为预测食品质量的指标^[60]。例如,Yang 等^[55]开发的一种由功能层和指示层组成的扩散型 TTI。在 TTI 被激活后,功能层中的显色元素将扩散到指示层中。通过研究 TTI 的颜色变化,构建了猕猴桃、草莓和芒果质量的预测模型,该模型能准确预测水果的质量损失、可溶性固形物与维生素 C 的含量、可滴定酸度和抗氧化能力等水果质量指标,误差小于 15%。作为一种无损、非接触、低成本和精准的果蔬质量判定方法,该 TTI 有望在食品行业得到广泛应用。

目前,已报道的智能包装大多是基于果蔬单一指标的评估,而忽略其它对产品稳定性和质量影响显著的因素。因此,可通过多种指标的同时测定,更准确地捕捉果蔬新鲜度、成熟度等的变化,以提升评估果蔬质量的准确性和灵敏度。此外,可将活性包装可与智能包装相结合,在发挥抗菌、抗氧化和其它贮藏功能的同时,实现果蔬质量监测功能。未来,智能包装的研发应更注重多指标评估技术的开发,在降低成本和符合法律监管的同时,扩展其实际应用的可行性。

3 活性包装与智能包装应用面临的问题与挑战

欧美等发达国家在功能性包装的研究起步早、应

用成熟,而我国虽然在功能性包装行业取得了许多创新性的研究成果,但研发的包装很少能够投入实际应用,且目前市场上大规模应用的包装材料主要依赖进口。所以,开发出能够实际应用的、拥有自主知识产权的和经济有效的功能性包装十分重要。

目前,活性包装和智能包装在实际应用时面临的障碍和限制主要有:1)已报道的许多功能性包装都是在实验室可控环境中进行测试的,实际应用时复杂的外界环境会严重影响包装的性能,换言之,这些包装材料并不稳定,在接触复杂的外界环境后极易被破坏。因此,应继续开发兼容性更高的包装材料,在确保有效发挥包装功能的同时,保持其稳定性;2)包装内添加的活性物质大多需要与食品或包装材料直接接触,才能发挥功能性包装的最大效果,这些活性物质可能会随着贮藏时间的延长逐渐渗入食品中,其是否会对消费者的饮食安全造成影响,仍需要进一步验证。所以,在开发功能性包装之前,必须仔细评估其对食品安全造成的影响,使其实际应用时符合相应的法律法规;3)新型的成膜包装材料大都不可降解,大规模的应用会造成一定环境污染问题。未来,随着合成生物学的不断发展,生物基的包装材料将逐步代替以聚合物为主的包装材料,这些新型材料将拥有更高的安全性和可降解性;4)商品化的功能性包装价格较贵,如何降低包装得加工成本有待进一步解决。进一步优化包装材料的生产工艺、继续开发用于智能包装的活性物质,仍是目前的研究重点。

4 总结与展望

功能性果蔬包装是基于传统果蔬包装开发的新型果蔬保鲜策略,其不仅具有传统食品包装的容纳、保护和展示的功能,还能延长果蔬的货架期并监测包装内果蔬的质量变化,受到了人们广泛关注。随着包装技术的不断发展以及大规模应用,功能性包装在降低食物浪费、保障食品安全和降低经济损失中展现出巨大潜力。

未来的工作应主要集中在以下两个方面:首先,研发新型的包装材料和活性物质,使其不会对食品质量造成影响,并继续降低包装成本;其次,改善包装材料与活性物质之间的相互作用,使活性物质在食品包装内持续稳定的释放,以提升果蔬货架期。随着人们对于绿色环保、低碳生活要求的不断提高,可降解、多功能和安全的食品包装将逐步代替传统以聚合物和纸基为主的食品包装。此外,随着万物互联技术的不断发展,功能性包装将通过网络和终端设备帮助人们有效判断和筛选他们需要的食品。

参考文献:

[1] SEPTEMBRE-MALATERRE A, REMIZE F, POUCHERET P. Fruits

- and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation[J]. Food Research International, 2018, 104: 86-99.
- [2] MELINI F, MELINI V, LUZIATELLI F, et al. Health-promoting components in fermented foods: An up-to-date systematic review[J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1189.
- [3] CHEN Q, QIAN J P, YANG H, et al. Sustainable food cold chain logistics: From microenvironmental monitoring to global impact[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 4189-4209.
- [4] 胡叶静,李保国,张敏,等.鲜切果蔬保鲜技术及方法研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(22):276-281.
- HU Yejing, LI Baoguo, ZHANG Min, et al. Progresses on fresh-keeping techniques and methods of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 276-281.
- [5] PRIYADARSHI R, RHIM J W. Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102346.
- [6] 刘梦琪,吕瑞,陈菊,等.壳聚糖的抗菌作用及在抑菌活性包装中的应用进展[J].食品科学,2024,45(1):261-271.
- LIU Mengqi, LV Rui, CHEN Ju, et al. Antibacterial action of chitosan and its application in antibacterial active packaging[J]. Food Science, 2024, 45(1): 261-271.
- [7] HAN J W, RUIZ-GARCIA L, 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.
- [8] 孙朋媛,曹传爱,刘骞,等.基于壳聚糖的智能指示包装及其在食品贮藏中应用的研究进展[J].食品工业科技,2023,44(10):416-422.
- SUN Penyan, CAO Chuan'ai, LIU Qian, et al. Research progress of intelligent indication packaging based on chitosan and its application in food storage: A review[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 2023, 44(10):416-422.
- [9] DAY B, POTTER L. Active packaging[J]. Food Beverage Packaging Technology, 2011: 251-262.
- [10] SUN Y T, ZHAO X Y, MA Y, et al. Inhibitory effect of modified atmosphere packaging on *Escherichia coli* O157: H7 in fresh-cut cucumbers (*Cucumis sativus* L.) and effectively maintain quality during storage[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130969.
- [11] ESCOBAR H J, GARAVITO J, CASTELLANOS D A. Development of an active packaging with an oxygen scavenger and moisture adsorbent for fresh lulo (*Solanum quitoense*)[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 349: 111484.
- [12] LENEVEU-JENVRIN C, APICELLA A, BRADLEY K, et al. Effects of maturity level, steam treatment, or active packaging to maintain the quality of minimally processed mango (*Mangifera indica* cv. José)[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(7): e15600.
- [13] NIMITKEATKAI H, TECHAVUTHIPORN C, BOONYARITTHONGCHAI P, et al. Commercial active packaging maintaining physicochemical qualities of carambola fruit during cold storage[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 32: 100834.
- [14] SINGH S, GAIKWAD K K, LEE Y S. Development and application of a pyrogallol acid-based oxygen scavenging packaging system for shelf life extension of peeled garlic[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256: 108548.
- [15] ADAY M S, CANER C, RAHVALI F. Effect of oxygen and carbon dioxide absorbers on strawberry quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(2): 179-187.
- [16] WANG H J, AN D S, RHIM J W, et al. A multi-functional biofilm

- used as an active insert in modified atmosphere packaging for fresh produce[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28(12): 999-1010.
- [17] 周嘉佳, 吴艳明, 张文乐, 等. 1-MCP 可控缓释包装纸对杏果实贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 248-254.
- ZHOU Jiajia, WU Yanming, ZHANG Wenle, et al. Effect of 1-MCP controlled release packaging paper on storage quality of apricot fruit[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(2): 248-254.
- [18] ZHANG Y, YUAN S, CHEN X, et al. Potential of metal-organic frameworks to adsorb ethylene for fresh produce active packaging applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2023, 35: 101034.
- [19] TIRGAR A, HAN D, STECKL A J. Absorption of ethylene on membranes containing potassium permanganate loaded into alumina-nanoparticle-incorporated alumina/carbon nanofibers[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(22): 5635-5643.
- [20] WANG C Y, AJJI A. Development of a novel ethylene scavenger made up of pumice and potassium permanganate and its effect on preservation quality of avocados[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 330: 111101.
- [21] 陈嘉琪, 张耘梦, 张黎明, 等. 不同包装方式对嫩鲜蒜贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(20): 28-34.
- CHEN Jiaqi, ZHANG Yunmeng, ZHANG Liming, et al. Effects of different packaging methods on the storage quality and antioxidant activity of fresh and tender garlic[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(20): 28-34.
- [22] SOLTANI FIROUZ M, MOHI-ALDEN K, OMID M. A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110113.
- [23] LEE D S, WANG H J, JAISAN C, et al. Active food packaging to control carbon dioxide[J]. *Packaging Technology and Science*, 2022, 35(3): 213-227.
- [24] KELLER N, DUCAMP M N, ROBERT D, et al. Ethylene removal and fresh product storage: A challenge at the frontiers of chemistry. Toward an approach by photocatalytic oxidation[J]. *Chemical Reviews*, 2013, 113(7): 5029-5070.
- [25] WEI H Y, SEIDI F, ZHANG T W, et al. Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 337: 127750.
- [26] 纪迎琳. 一氧化氮通过 MdERF5 抑制苹果果实成熟过程中乙烯合成的分子机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- JI Yinlin. The mechanism for nitric oxide-activated MdERF5 suppresses the ethylene biosynthesis of apple fruit[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.
- [27] LIU J L, YANG J, ZHANG H Q, et al. Melatonin inhibits ethylene synthesis via nitric oxide regulation to delay postharvest senescence in pears[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(8): 2279-2288.
- [28] KIM S, JEONG G H, KIM S W. Ethylene gas decomposition using ZSM-5/WO₃-Pt-nanorod composites for fruit freshness[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(13): 11250-11257.
- [29] 王超, 杨子明, 何祖宇, 等. 乙烯清除剂在果蔬保鲜中的研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2022, 22(9): 82-88.
- WANG Chao, YANG Ziming, HE Zuyu, et al. Research progress of ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables[J]. *Storage and Process*, 2022, 22(9): 82-88.
- [30] 周悦, 吴雪辉, 谢家星, 等. 可食性肉桂精油复合膜的制备及其缓释性能[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 170-176.
- ZHOU Yue, WU Xuehui, XIE Jiaxing, et al. Preparation and sustained release properties of cinnamon edible essential oil composite film[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 170-176.
- [31] RASHID Z, KHAN M R, MUBEEN R, et al. Exploring the effect of cinnamon essential oil to enhance the stability and safety of fresh apples[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(12): e14926.
- [32] 陈梦林. 精油微胶囊/玉米淀粉/PLA 双层膜的制备及在双孢蘑菇保鲜中的应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- CHEN Menglin. Preparation of essential oil microcapsules/corn starch/PLA double-layer membrane and its application in preservation of *Agaricus bisporus*[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [33] SHAO P, YU J, CHEN H J, et al. Development of microcapsule bio-active paper loaded with cinnamon essential oil to improve the quality of edible fungi[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 27: 100617.
- [34] DUDA-CHODAK A, TARKO T, PETKA-PONIATOWSKA K. Antimicrobial compounds in food packaging[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(3): 2457.
- [35] YILMAZ P, DEMIRHAN E, OZBEK B. Development of *Ficus carica* Linn leaves extract incorporated chitosan films for active food packaging materials and investigation of their properties[J]. *Food Bioscience*, 2022, 46: 101542.
- [36] LIU S J, GAO X Q, FAN H, et al. Green and recyclable graphitic carbon nitride/chitosan/polyvinyl alcohol photocatalytic films with efficient antibacterial activity for fruit packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 236: 123974.
- [37] JIANG T J, FENG L F, WANG Y B. Effect of alginate/nano-Ag coating on microbial and physicochemical characteristics of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) during cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(2): 954-960.
- [38] KOUSHESH SABA M, AMINI R. Nano-ZnO/carboxymethyl cellulose-based active coating impact on ready-to-use pomegranate during cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2017, 232: 721-726.
- [39] DASH K K, DEKA P, BANGAR S P, et al. Applications of inorganic nanoparticles in food packaging: A comprehensive review[J]. *Polymers*, 2022, 14(3): 521.
- [40] BOVI G G, CALEB O J, KLAUS E, et al. Moisture absorption kinetics of FruitPad for packaging of fresh strawberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 223: 248-254.
- [41] RUX G, MAHAJAN P V, LINKE M, et al. Humidity-regulating trays: Moisture absorption kinetics and applications for fresh produce packaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(4): 709-716.
- [42] AZEREDO H M C, CORREA D S. Smart choices: Mechanisms of intelligent food packaging[J]. *Current Research in Food Science*, 2021, 4: 932-936.
- [43] CHENG H, XU H, JULIAN MCCLEMENTS D, et al. Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131738.
- [44] SOHAIL M, SUN D W, ZHU Z W. Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(15): 2650-2662.
- [45] CHEN H Z, ZHANG M, 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.
- [46] KIM Y H, YANG Y J, KIM J S, et al. Non-destructive monitoring of apple ripeness using an aldehyde sensitive colorimetric sensor[J].

- Food Chemistry, 2018, 267: 149-156.
- [47] ZABIDI N', NAZRI F, TAWAKKAL I S M A, et al. Characterization of active and pH-sensitive poly(lactic acid) (PLA)/nanofibrillated cellulose (NFC) films containing essential oils and anthocyanin for food packaging application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 212: 220-231.
- [48] ZONG Z H, LIU M, CHEN H J, et al. Preparation and characterization of a novel intelligent starch/gelatin binary film containing purple sweet potato anthocyanins for *Flammulina velutipes* mushroom freshness monitoring[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134839.
- [49] ZHOU W, WU Z G, XIE F W, et al. 3D printed nanocellulose-based label for fruit freshness keeping and visual monitoring[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 273: 118545.
- [50] ISKANDAR A, YULIASIH I, WARSIKI E. Performance improvement of fruit ripeness smart label based on ammonium molybdate color indicators[J]. Indonesian Food Science & Technology Journal, 2020, 3(2): 48-57.
- [51] LI X, XU C C, DU X S, et al. Assembled reduced graphene oxide/tungsten diselenide/Pd heterojunction with matching energy bands for quick banana ripeness detection[J]. Foods, 2022, 11(13): 1879.
- [52] 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.
- [53] NIPONSAK A, LAOHAKUNJIT N, KERDCHOECHUEN 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.
- [54] ADIANI V, GUPTA S, VARIYAR P S. A simple time temperature indicator for real time microbial assessment in minimally processed fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 311: 110731.
- [55] YANG J M, XU Y. Prediction of fruit quality based on the RGB values of time-temperature indicator[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3): 932-941.
- [56] DING L, LI X, HU L C, et al. A naked-eye detection polyvinyl alcohol/cellulose-based pH sensor for intelligent packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 233: 115859.
- [57] SHAO P, LIU L M, YU J H, et al. An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 285-296.
- [58] FERREIRA G R, FIDÊNCIO P H, CASTRICINI A, et al. Volatile compounds of umbu (*Spondias tuberosa* Arruda) fruits during post-harvest ripening from two accessions[J]. Food Science and Technology, 2022, 42: e42321.
- [59] LENG P, HU H W, CUI A H, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds of honey peach packaged with different preservation methods during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111963.
- [60] GAO T T, TIAN Y, ZHU Z W, et al. Modelling, responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 311-322.

责任编辑:张璐

收稿日期:2023-05-08