

新材料技术

功能性食品包装材料的研究进展及发展趋势

王梦军, 年琳玉, 曹崇江
(中国药科大学, 南京 211198)

摘要: **目的** 介绍国内外功能性食品包装材料的最新研究进展, 指出目前食品包装存在的问题, 阐述未来功能性食品包装材料的发展趋势。 **方法** 总结国内外不同功能的食品包装(智能包装、抑菌包装、阻隔包装、乙烯吸附及释放包装、生物可降解包装等)的研究现状, 简要介绍不同功能食品包装的组成、制备以及应用。 **结果** 不同功能性的食品包装在食品的贮藏、保鲜、品质监测等方面发挥着重要作用。由于目前食品包装的功能较为单一、包装材料缺乏环保性且成本较高, 难以商业化应用, 因此开发环保、价格低廉的多功能性复合包装在食品品质保障方面具有重要意义。 **结论** 开发绿色、环保的多功能复合包装材料应用于食品保鲜、品质监测具有广阔的发展前景。

关键词: 食品; 功能性包装; 研究进展; 发展趋势

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)07-0065-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.009

Research Progress and Development Trend of Functional Food Packaging Materials

WANG Meng-jun, NIAN Lin-yu, CAO Chong-jiang

(China Pharmaceutical University, Nanjing 211198, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the latest research progress of functional food packaging materials at home and abroad, point out the existing problems of food packaging and elaborate the development trend of functional food packaging materials in the future. The research status of different functional food packaging at home and abroad (intelligent packaging, bacteriostatic packaging, barrier packaging, ethylene adsorption and release packaging, biodegradable packaging, etc.) was summarized. The composition, preparation and application of different functional food packaging were briefly introduced. Different functional food packaging played an important role in food storage, preservation, quality monitoring, etc. However, as the function of current food packaging is relatively simple, the packaging material is lack of environmental protection and the cost is high, the development of environmentally-friendly, low-cost multi-functional composite packaging is of great significance in ensuring food quality. The green, environmentally-friendly multi-functional composite packaging materials developed and used for food preservation and quality monitoring has a broad development prospect.

KEY WORDS: food; functional packaging; research progress; development trend

包装旨在确保产品的质量、卫生、完整性和安全性^[1], 是为运输、分配、存储、零售和后续准备货物

的协调系统^[2-3]。食品包装是食品供应链中必不可少的组成部分, 充当着食品的保护层或屏障层, 避免受

收稿日期: 2020-02-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0400901); 国家自然科学基金(31571901); 江苏省重点研发计划(BE2016386)

作者简介: 王梦军(1995—), 男, 中国药科大学硕士生, 主攻果蔬贮藏保鲜包装。

通信作者: 曹崇江(1977—), 男, 博士, 中国药科大学教授, 主要研究方向为智能食品包装材料农产品贮藏与保鲜。

到外界不利因素(例如腐败微生物、化学污染物、氧气、水分、光照、外力等)的影响,保证食品在存储和运输过程中的质量安全,并延长其保质期^[4]。传统包装材料(如塑料、玻璃、纸、陶瓷和金属等)主要用作被动和惰性屏障,目的是防止水分、氧气和细菌等污染物进入食品。随着人们生活水平的不断提高,消费者对食品安全越来越重视,这就迫使包装材料和技術需要不断创新^[5]。食品包装的创新将有助于满足市场不断变化的需求,比如减少食物的浪费,提高产品质量,延长其保质期,以及减少食品包装对环境的负面影响等^[6]。近年来,新兴的功能性包装为延长货架期、提高食品质量和安全提供了众多创新性的解决方案^[7]。

随着新材料的开发,以实时方式检测和反馈食品质量创新方法的发展,包装材料所包含的功能也在不断增加。为了保障食品质量与安全,以及延长食品的货架期,近些年来开发了多种多样的功能性食品包装,比如监测食品品质的智能包装,具有抑制微生物的抑菌包装,还有调控果蔬成熟的乙烯抑制和释放的包装,以及具有可生物降解的环保型包装等,这些功能性食品包装在食品的贮藏、保鲜、品质监测等方面发挥着重要作用。功能性食品包装依然面临一些问题与挑战,比如与传统包装材料相比,包装材料具有成本较高,加工工艺更加复杂,存在潜在安全性问题等缺点,这些问题限制了包装材料的商业化应用。

笔者旨在介绍近些年来国内外功能性食品包装材料(智能包装、抑菌包装、阻隔包装、乙烯调控包装和可生物降解包装等)的研究进展,指出目前功能性包装材料面临的问题,并为未来功能性食品包装材料的发展指明方向。

1 食品包装的分类

食品包装在食品工业中起着重要的作用,因为它能够改善食品的储存、运输环境,以延长其保质期,减少食物的浪费,并避免重大的经济损失。为了更好地延长食品的货架期,保持食品的质量,人们一直在努力开发新型的食品包装技术和包装材料^[2, 8]。食品包装的种类繁多,按包装材料的功能大致可分为智能包装、抑菌包装、阻隔包装、可生物降解包装,以及用于果蔬保鲜的乙烯调控包装等。下面就不同种类的功能性食品包装的研究进展进行阐述。

1.1 智能食品包装

智能包装的概念于20世纪90年代提出,开发智能包装的目的是通过各种信号(颜色、荧光等信号)的变化向客户提供有关食品质量和安全性的信息,从

而实时监测包装内食品的品质^[3]。智能食品包装按其工作原理可分为指示剂包装、传感器包装和射频识别(RFID)包装等,它们在食品品质监测、追踪溯源等方面发挥着极其重要的作用,并推动食品包装向功能化、信息化和智能化发展^[9]。

1.1.1 指示剂包装

指示包装可根据包装内部的温度、pH值、新鲜度和泄漏量等指标的变化,并通过包装袋中的指示剂颜色的改变,及时向消费者传达包装内部信息,从而可以直观反映食物的新鲜度^[10]。

Chen等^[11]开发了一种基于pH染料的指示剂标签,用于评估鲜切辣椒是否变质,将甲基红和溴百里酚蓝溶液按照体积比为3:2混合,并置于指示剂膜溶液中,制成体积分数为7%的混合指示剂,与单独使用溴百里酚蓝制备的指示剂相比,该指示剂可以更清楚地监测辣椒的腐烂情况,指示剂标签会由黄绿色变为橙色。食品的微生物腐败伴随着CO₂的显著增加,Saliu等^[12]研制了一种CO₂泄漏指示包装,该指示剂由赖氨酸/ε-聚赖氨酸(EPL)/花青素组成,该指示剂在较低的浓度下也可以检测CO₂气体,不到5min的时间内指示剂就由天蓝色变为紫色(见图1)。除了有对果蔬新鲜度的指示包装外,还有一些针对肉制品的指示包装研究。Zhang等^[13]开发了一种用于监测猪肉新鲜度的指示包装,该包装以淀粉、聚乙烯醇和壳聚糖为基质,以玫瑰茄花青素为pH值指示剂,猪肉在贮存过程中挥发性盐基氮水平的升高会导致指示剂颜色由红向绿色变化,从而可以实时监测猪肉的新鲜度。

1.1.2 传感器包装

传感器是一种电子设备。传感器包装利用传感器进行探测,将一种形式的信号转换成另一种形式^[14]。根据传感器的工作类型,传感器可分为主动型和被动型。化学和生物传感器已经成为智能包装的工具,并应用于食品领域,比如监测包装袋内的pH值、湿度、微生物等指标^[15—16]。

细菌的滋生会导致食物的腐败,食用被细菌污染的食物将严重影响人们的身体健康,因此对于细菌的检测尤其重要^[17—22]。Yousefi等^[23]设计了一种基于细菌检测的荧光传感包装,这种传感器通过将大肠杆菌特异性RNA裂解荧光DNA酶探针(RFD-EC1)的微阵列共价连接到超薄、柔软且透明的环烯烃聚合物(COP)薄膜上。当食物中滋生大肠杆菌时,这种荧光传感器在紫外光的激发下发射出绿色荧光,因此可以实时监测食物上是否有大肠杆菌(见图2)。除了将生物传感器运用到食品包装上,还有一些学者将化学传感器运用到食品包装上,Wen等^[24]开发了基于可逆非氧化还原酸/碱掺杂法的聚苯胺(PANI)/聚酰胺66(PA66)

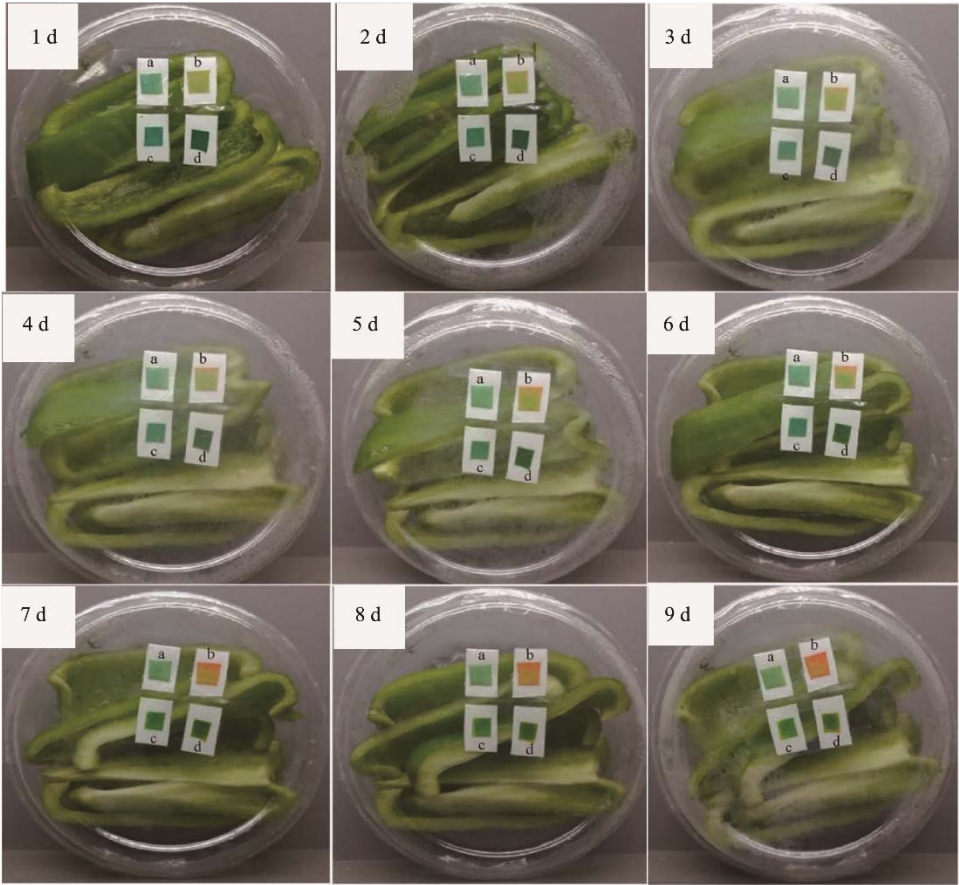


图 1 基于 pH 染料的指示剂标签用于评估鲜切辣椒的新鲜度
Fig.1 Indicator labels based on pH dyes used to assess the freshness of fresh-cut chilies

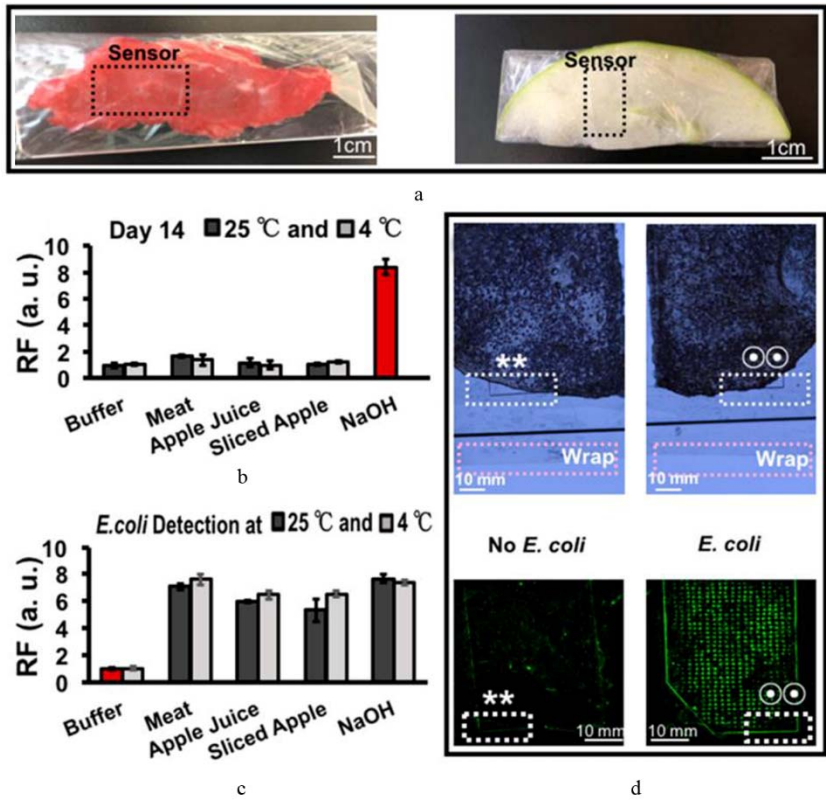


图 2 (RFD-EC1)-COP 生物传感器用于实时监测细菌污染
Fig.2 (RFD-EC1)-COP biosensor for real-time bacteria pollution monitoring

纳米纤维传感器薄膜,这种传感器薄膜可用于检测抗坏血酸(L-AA),即使在低浓度(0.05×10^{-6})下也能显示出可见的颜色变化,并且可以通过手机自动读出。

虽然传感器包装能够便捷地给消费者提供食品的新鲜度等信息,但是目前传感器价格昂贵,且有的传感器存在潜在毒性,限制了其商业化应用^[3]。由此可见,开发成本低、安全性高的智能传感包装用于食品品质监测具有很好的发展前景。

1.1.3 射频识别包装

射频识别(RFID, Radio Frequency Identification)技术是一种利用射频通信实现的非接触式自动识别技术,这种技术可以在没有人为干预下使用无线传感器来识别产品,并收集数据^[3, 25—26]。近年来,射频识别技术也越来越多地运用到食品包装上,因为 RFID 技术的成本相对较低廉,它通常使用常规的方法(例如丝网印刷和喷墨)将 RFID 标签印刷在包装上。目前,市场上已经将 RFID 技术用于监测温度、湿度、光照、压力和 pH 值等^[27]。意大利 Arnaldo Caprai (阿纳尔多·卡普雷)红酒公司将 RFID 标签运用到红酒的酒盖上,主要用于一些贵重酒类的品质监测,同时该酒盖带有温度传感器,可以在红酒运输过程中实时监测温度变化^[28]。Fiddes 等^[27]构建了一个无线、被动的蒸汽传感器,它由炭黑和聚合物组成,已知炭黑在某些挥发性化学物质存在时会膨胀。当炭黑/聚合物与 RFID 标签的电路集成时,产生了电阻变化,从而会改变标签的输出信号频率。为了识别不同的蒸气,将传感器系统暴露在 16 种不同聚合物的标签阵列中,聚合物的气体与固体的分配系数不同,会产生一种可识别的信号变化模式,以识别存在的蒸气。该方法可以成功地检测水、氨、乙醇和甲苯等蒸气,因此可以将其作为潜在的食品包装检测方法,以检测能产生这几种蒸气的食物。

1.2 抗菌包装

食品中营养物质丰富,易于滋生微生物,导致食物腐败变质,使食物丧失食用价值和经济价值,因此开发抗菌包装对于延长食品货架期具有重要意义。抗菌包装即将无毒无害的抗菌剂添加到包装材料中,通过缓慢释放包装材料中的抗菌剂,从而发挥抑菌作用^[29]。根据组成、来源、作用机理,目前抗菌剂可分为 3 种:无机抗菌剂、有机抗菌剂、天然抗菌剂^[30]。下面主要介绍基于这 3 种抑菌剂的抗菌包装。

1.2.1 无机抗菌包装

无机抗菌剂主要包括纳米 Ag、纳米氧化物(如纳米 ZnO、TiO₂、CuO 等),还包括纳米黏土、石墨烯,以及一些新型的无机纳米复合材料。无机抗菌剂与有机和天然抗菌剂相比,具有抗菌范围广、抗菌效果好和有效期长等优点^[29],它们可以通过缓慢释放金属离子,与细菌相互作用,或者释放抗菌活性物质(活性氧)破坏细菌的细胞膜和细菌细胞内的 DNA、酶、蛋白质以及线粒体,从而起到长期有效的抗菌作用(见图 3)^[31],下面将介绍一些无机抗菌包装的最新研究进展。

纳米 Ag 是一种公认的抗菌剂,被广泛应用于生物医学^[32]、食品^[33]、催化^[34]等领域。笔者课题组^[35]开发了一种基于纳米 Ag 的抗菌复合包装,纳米 Ag 的聚集会导致抑菌效果变差,为了提高纳米 Ag 的抑菌效果,通过强静电吸附技术将纳米 Ag 负载在 TiO₂ 表面制备成 Ag/TiO₂ 复合物。该方法使银粒子均匀地分布在 TiO₂ 上,能长期稳定地释放银离子,提高了银的利用效率,从而发挥长期的抑菌效果。将该纳米复合物与低密度聚乙烯(LDPE)进行共混、造粒、吹膜等,制备出纳米复合包装,研究结果表明该纳米复合物能均匀地分散在聚乙烯薄膜中,并且该纳米复合

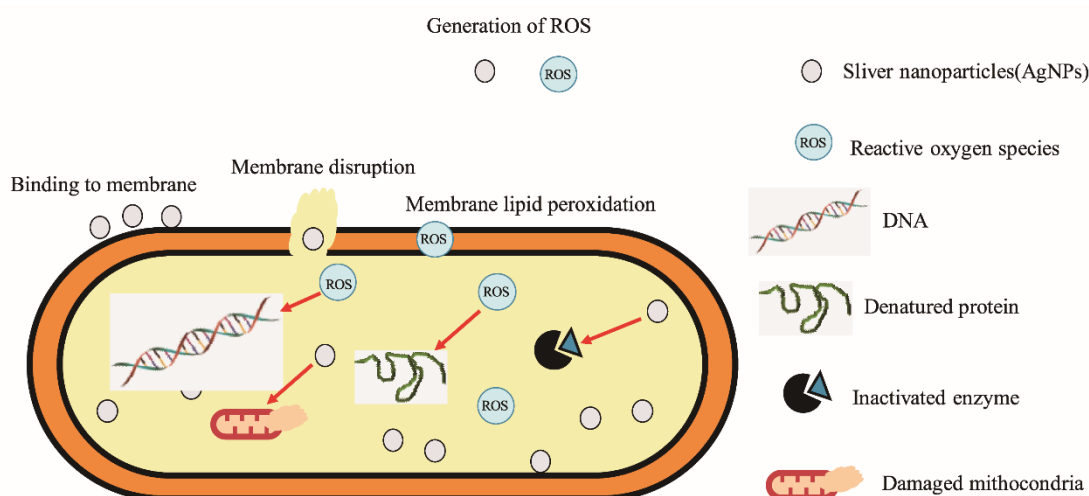


图 3 纳米银的抑菌机理

Fig.3 Antimicrobial mechanisms of silver nanoparticles

包装可以延长胚芽米的贮存时间^[36]。纳米 ZnO 是一种较为安全、抑菌性能良好的抑菌剂, Kim 等^[37]通过溶剂浇铸法将表面带正电的纳米 ZnO 引入可生物降解的聚乳酸 (PLA) 中, 制备了一系列 PLA/ZnO 纳米复合材料膜, 表面带正电的纳米 ZnO 与带负电的细菌膜之间的强相互作用导致活性氧 (ROS) 的产生, 并最终导致细菌细胞死亡, 因此 PLA/ZnO 复合膜可以作为潜在的抗菌食品包装材料。TiO₂ 是一种安全无毒的光催化型抗菌剂, 李梅等^[38]以 LDPE 为基质, 以 TiO₂、分子筛 ZSM-5 为光催化剂和乙烯清除剂制备出抑菌的乙烯清除包装, 当 TiO₂ 的质量分数为 5% 时, 该包装的抑菌率能达到 90%。

虽然无机纳米复合材料具有高效且长期的抑菌效果, 但是其成本较高、制备工艺复杂, 并且金属离子迁移到食品上存在潜在的毒性^[39-40]。由此可见, 对于如何降低无机抗菌包装生产成本, 并保障其安全性是今后需要关注的问题。

1.2.2 有机抗菌包装

有机抗菌剂分为两大类, 包括低分子有机抗菌剂和高分子有机抗菌剂。低分子有机抗菌剂有季铵盐、季磷盐、咪唑类、卤胺化合物、双胍类和有机金属等。高分子有机抗菌剂是一类高分子聚合物, 通过将抗菌官能团单体共聚或接枝得到^[29]。有机抗菌剂主要通过抑制细菌蛋白/细胞壁的合成, 或者与带负电的细菌细胞膜相互作用, 从而起到抑菌的作用。有机抗菌剂与无机和天然抗菌剂相比, 具有广谱高效的杀菌能力, 并且还具有来源广泛、成本低廉和加工工艺简单等优点。

季铵盐是一种常见的抗菌剂, 季铵盐带正电荷, 可以与带负电的细菌细胞膜作用, 导致细菌的死亡^[41]。Min 等^[42]以季铵盐改性壳聚糖 (HACC) 和聚乙烯醇 (PVA) 为原料, 采用简单、环保的溶液浇铸法制备具

有透明、可生物降解、防雾和抗菌等性能的多功能食品包装复合涂层。季铵盐化改性使涂层同时具有良好的防雾和抗菌功能, 复合涂层对 *E. coli*、*S. aureus* 和 *Botrytis cinerea* 的抑制率达到 99%, 并且可以延长草莓的贮存时间。Liu 等^[43]通过原位绿色合成法制备了具有可充电抗菌活性的 N-卤胺化合物 (DMDMH) 接枝聚乙烯醇 (PVA) 电纺纳米纤维膜 (CPDNM-Cl), 该膜具有长期耐用性和强大的机械强度, 可在 1 min 内灭活 6 lg CFU/g 的致病性大肠杆菌。

有机抗菌包装具有独特的优势, 但是也有一些缺点, 如低分子类有机抗菌剂稳定性较差、毒性较大; 高分子有机抗菌剂虽然稳定性较高、毒性小, 但是抗菌效果稍差、合成困难。由此可见, 如何开发抗菌性能高、稳定性高、毒性小且合成简便的有机抗菌剂用于食品包装是今后需要解决的问题。

1.2.3 天然抗菌包装

天然抗菌剂是一类源自自然界的抗菌剂, 天然抗菌剂的获取需要经过提取、分离、纯化等步骤。常见的天然抗菌剂包括植物源的植物精油、抗菌肽、萜类、多糖类、生物碱类物质, 以及动物源的壳聚糖、氨基酸、肽类等物质, 还有微生物源的微生物代谢物、内生菌等^[44]。天然抗菌剂的机理目前认为是通过致使微生物蛋白变性, 能量合成受阻, 干扰细胞代谢, 从而发挥抑菌效果^[29-30]。天然抗菌剂最突出的优势就是安全无毒, 且抑菌效率也较好, 因此近些年来对于天然抗菌包装的研究也越来越多。

Tang 等^[45]通过静电纺丝法制备了掺有 2 种植物精油 (EO) 的明胶纳米纤维, 这 2 种植物精油分别为薄荷精油 (PO) 和洋甘菊精油 (CO), EO 的加入导致纳米纤维的水接触角增加, 添加 PO 后对 *E. coli* 和 *S. aureus* 有明显抑制作用, 且该纳米纤维/EO 无细胞毒性, 可以作为潜在的可食包装 (见图 4)。Yadav

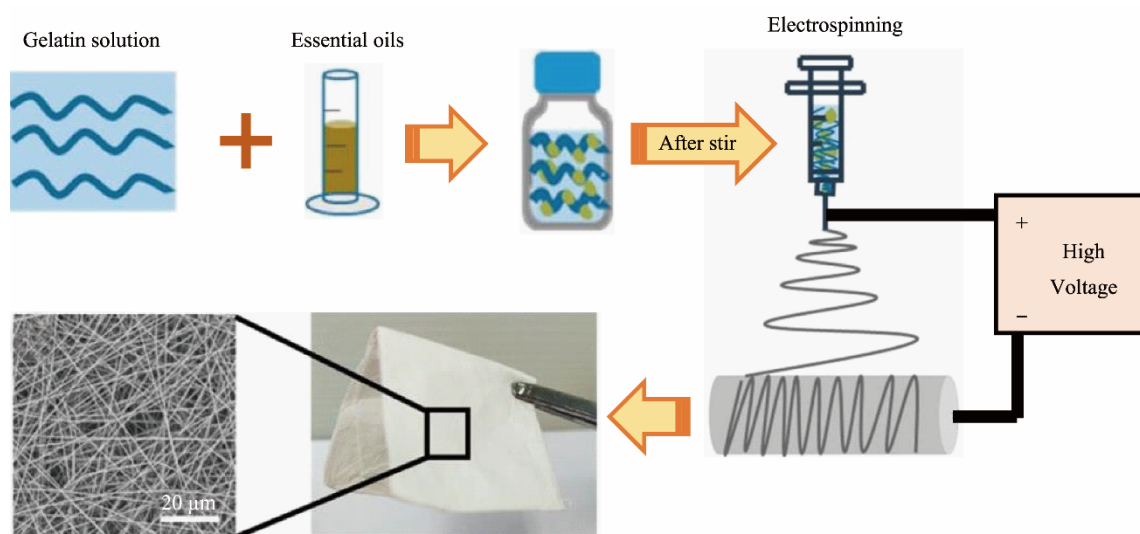


图 4 明胶/植物精油纳米纤维制备示意

Fig.4 Schematic diagram of the preparation of gelatin/EO nanofibers

等^[46]采用溶液流延法合成了含有槲皮素-淀粉(Q)的环保型壳聚糖-明胶(Ch-ge)生物复合膜(Ch-ge-Q),该膜对革兰氏阳性菌(*B. subtilis*)和革兰氏阴性细菌(*E. coli*)有很好的抑制作用,尤其对于*E. coli*菌株,还具有抗氧化活性。有许多研究将天然抗菌剂封装到微胶囊或者多孔结构中,通过释放抗菌剂达到保鲜效果^[47—49]。辣椒素(Capsaicin)是一种天然抗菌剂,Zhao等^[50]将 Fe^{3+} 掺杂的金属有机骨架(FeIII-HMOF-5)作为辣椒素的纳米载体,并将其掺入明胶/壳聚糖基质中,以制备抗菌包装膜,辣椒素负载的Cap- FeIII-HMOF-5 制成明胶/壳聚糖薄膜后,薄膜的拉伸强度、水蒸气渗透性和紫外线阻隔性能得到显著提高。此外,Cap- FeIII-HMOF-5 通过在新鲜苹果丁上的实际应用,赋予了明胶/壳聚糖膜对大肠杆菌的高效抗菌活性。

由于天然抗菌剂具有安全性高的特点,因而备受关注。天然抗菌剂也存在提取加工较为困难,抗菌性能不及无机和有机抗菌剂等缺点。由此可见,为了将天然抗菌剂应用于食品包装领域中,需要进一步优化天然抗菌剂的提取工艺,并通过改性来提高天然抗菌剂的抑菌效果。

1.3 乙烯调控包装

新鲜果蔬对人们的健康很重要。对于呼吸跃变型果蔬而言,在贮存过程中会产生乙烯,乙烯会加快果蔬在贮藏期间的成熟速度,导致其保质期变短^[51],因此通过安全有效的方法调控乙烯的产生,对延长采后货架期、控制果实成熟具有重要意义^[52]。通过包装微环境控制果蔬的成熟度是一种比较有效的措施^[53],在包装材料中加入乙烯清除剂、乙烯受体拮抗剂等可以延缓果蔬的成熟进程,还可以在包装中加入促进乙烯

释放的物质,以达到催熟效果。

1.3.1 乙烯清除包装

传统清除和吸收乙烯的方法是在包装袋内加入高锰酸钾、活性炭、沸石、金属有机框架(Metal Organic Frameworks, MOFs)等能氧化或者吸附乙烯的物质,以及乙烯受体拮抗剂(甲基环丙烯(1-MCP)^[54]、一氧化氮(NO)^[55]和硫化氢(H_2S)^[56]等)。虽然这些乙烯清除剂使用简便,但是其性质不稳定,脱除过程不可逆,且具有一定的毒性^[57]。为了避免以上问题,Kaewklin等^[58]采用溶液浇铸法制备了 TiO_2 /壳聚糖纳米复合膜,该复合膜可以在紫外光照射下产生活性氧,活性氧可以将乙烯转化成二氧化碳和水,从而延缓番茄的成熟进程和品质的变化(见图5)。笔者课题组^[57]研制了一种复合涂层,首先从分枝杆菌JS60中纯化单加氧酶(MOs),MOs可以将乙烯转化成环氧乙烷,然后与海藻酸钠(SA)混合形成 MOs@SA 溶液,将新鲜香蕉浸泡在溶液中,取出晾干后在香蕉表面形成复合涂层,与海藻酸钠处理组相比, MOs@SA 涂层处理后香蕉的货架期可延长约30%,而且这种涂层安全无毒,在呼吸跃变型果蔬保鲜方面具有潜在的应用价值。

1.3.2 乙烯释放包装

与乙烯清除发挥相反作用的是释放乙烯达到催熟效果的乙烯释放包装,目前对于该类包装的研究相对较少^[59]。乙烯利是一种常用的催熟剂,笔者课题组^[60]为了解决乙烯利在催熟过程中的残留问题,将乙烯利与低密度聚乙烯(LDPE)共混、造粒、吹膜,制备出乙烯缓释包装,该包装解决了乙烯利残留在果蔬表面的安全问题,同时可以通过缓释乙烯达到催熟香蕉的目的。Capozzi等^[61]设计了一种乙烯释放

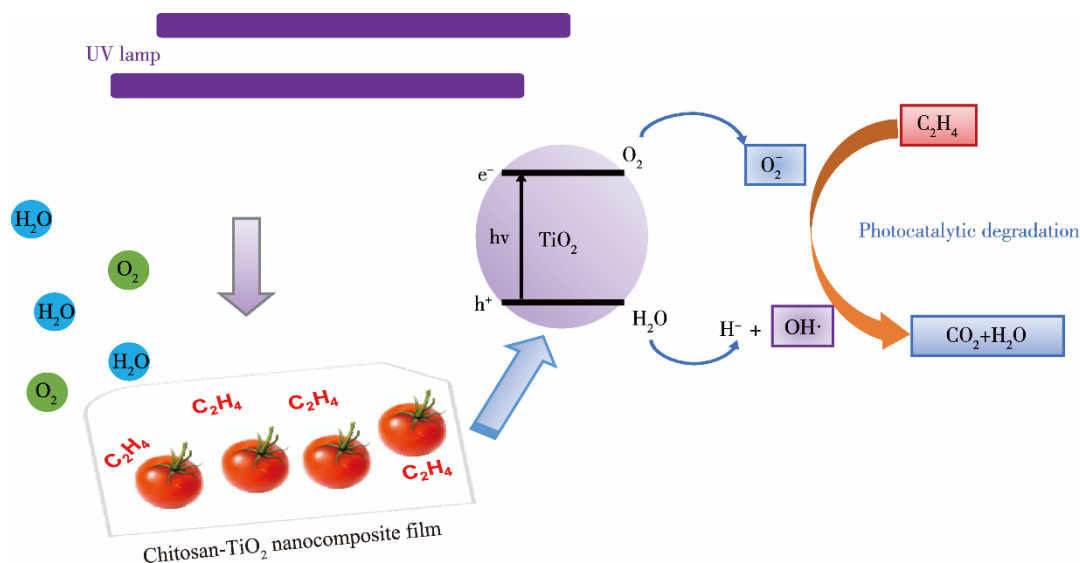


图5 TiO_2 /壳聚糖纳米复合膜在紫外光照射下对番茄贮藏过程中乙烯的降解

Fig.5 Degradation of ethylene in tomato storage by TiO_2 /chitosan nanocomposite film under UV light

包装,首先通过分子包封法制备了 α -环糊精和乙烯的包合物,然后通过溶剂浇铸法将其分散在聚苯乙烯薄膜中,乙烯的释放取决于包装环境的相对湿度和温度,该复合膜可以在预期时间内释放乙烯,以促进水果的成熟。

虽然这些包装能够释放乙烯,达到催熟的效果,但是还不能够按照需求控制乙烯释放量,因此需要设计能够控制乙烯释放量的响应性智能包装,以满足催熟需求。

1.4 阻隔包装

包装的阻隔性能是基本要求,其在食品供应链中必不可少,充当保护层或屏障层的作用,通过阻隔外界的污染物、气体、光线和水分等,从而防止食品的变质^[62]。根据包装的阻隔性可以分为阻氧材料、阻光材料、防潮材料和防静电材料,传统的阻隔包装材料多为玻璃、塑料、金属和陶瓷等,近些年来有许多新材料和新技术应用于阻隔包装。

为了发挥包装材料的阻隔效果,通过研究发现在包装材料的基质中添加纳米材料可以提升包装的阻隔性能^[63],而且也可以在包装表面喷涂纳米涂层以增加阻隔效果。Kim 等^[64]将一种高柔性、可见光和射频透明的涂层应用在商业聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜上,采用喷雾辅助逐层组装的方法,在带负电荷的纤维素纳米纤维和带正电荷的甲壳素纳米晶须之间实现了纳米级共混。这些高度结晶的纳米材料之间的协同作用形成了具有优异屏障特性的柔性薄膜(见图 6)。Sangroniz 等^[65]为了解决塑料(PET, LDPE, PP 等)包装材料的不可降解、难以回收、生物基聚合物包装材料阻隔性能差等问题,设计了一种可回收且阻隔性能良好的新型包装材料。该包装由共聚物 PT6HP-co-PyBL 组成,具有优异的阻隔性和力学性能,可与商业石油基聚合物相媲美,并且在某些

性能上优于迄今为止阻隔性能较好的 2 种生物基聚合物 PLA 和聚羟基丁酸盐(PHB),因此这种复合包装材料可以作为具有高阻隔性能的食品包装。

目前用于食品上的阻隔包装多为石油基材料,虽然这些包装材料阻隔性能良好,但是具有不可生物降解、难回收等环境问题和经济问题,因此如何设计可回收、可生物降解、低成本的新型阻隔包装是亟待解决的问题。

1.5 可生物降解包装

由于石油基塑料包装材料(PE, PP, PET, PVC 等)具有成本较低、力学性能良好、阻隔性能良好和热密封性能良好等优点,使得塑料成为现代生活中不可缺少的材料,也成为食品包装应用中的首选材料。由于塑料难以降解、难以回收,只能通过焚烧和填埋的方式进行处理,因此对水源、土壤和空气等易造成严重污染,使得环境问题变得越来越严峻^[66]。鉴于当前对环境保护的重视,近些年越来越多的研究将可生物降解材料应用到食品包装上^[67]。

生物可降解包装材料由生物聚合物制备而成,生物聚合物可根据其来源分为天然聚合物、合成聚合物和微生物聚合物。常见的天然聚合物包括蛋白质和碳水化合物,其中蛋白类又包括大豆分离蛋白、小麦分离蛋白、玉米蛋白和明胶等,而碳水化合物包括淀粉纤维素、壳聚糖和琼脂等;合成聚合物包括聚乳酸(PLA)、聚己内酯(PCL)和聚乙烯醇(PVA)等;微生物聚合物包括聚羟基丁酸盐(PHB)和碳水化合物(包括支链淀粉和凝胶多糖等)^[68]。这些聚合物如果单独使用,则其拉伸性能、力学性能和阻隔性能均较差,研究发现将几种可生物降解聚合物共混可以克服这些缺点。Masmoudi 等^[69]为了增加生物可降解膜的力学性能,将聚乳酸(PLA)与纤维素纤维进行混合,当纤维素的质量分数为 10%时,膜的力学性能得到显

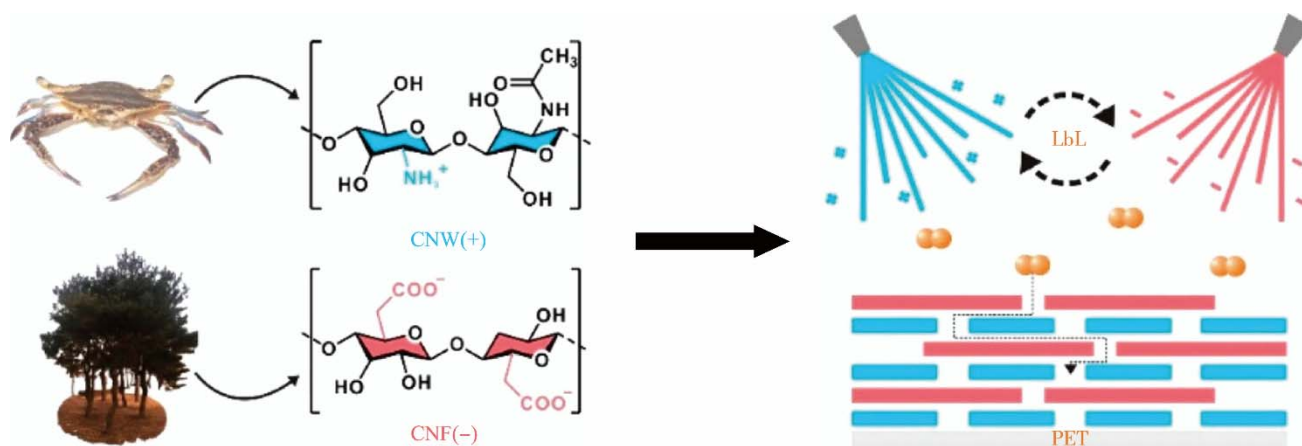


图 6 在 PET 上通过逐层组装的方式制备气体阻隔纳米涂层示意

Fig.6 Schematic diagram of gas barrier nano-coatings prepared on PET by layer-by-layer assembly

著增加。Gómez-Aldapa 等^[70]研制了一种基于淀粉的可降解包装,通过将聚乙烯醇(PVA)与马铃薯淀粉按不同比例(0~60%)混合后发现,PVA的加入改善了膜的透气性和力学性能,因此,2种或者多种聚合物的混合是改善包装性能的关键,而且不会影响包装的生物降解性能。

1.6 其它功能性包装

除了以上几种功能性食品包装外,还有一些其它功能的食品包装,包括吸收氧气、二氧化碳、水分和气味的活性包装,还包括具有抗氧化功能的抗氧化包装,以及用于冷链物流运输的控温包装等,这些包装也在食品的贮藏保鲜方面也发挥着积极有利的作用。

2 功能性食品包装面临的挑战

随着人们生活水平的不断提高,人们对食品包装的需求也越来越高,因此越来越多的功能性食品包装被研制出来,食品包装的功能趋于完善,包装的材料也逐渐成熟,但是功能性食品包装依然面临以下几方面的挑战。

2.1 食品包装的功能较为单一

影响食品品质的因素多种多样,比如贮存的温度、湿度、光照、气体环境和微生物的滋生等,对于单一功能的食品包装可能还不足以满足食品保鲜与品质监测的需求。目前所研究的食品包装大多仅仅针对1种功能,如单一的抑菌、监测新鲜度、清除乙烯等功能,而多功能于一体的智能食品包装则能够更大程度地延长食品的货架期,因此如何设计多种功能于一体的复合食品包装材料是目前的问题和挑战。

2.2 食品包装材料缺乏环保性、安全性

虽然已有许多可生物降解包装方面的研究,但是目前功能性食品包装主要以不可生物降解的材料为主,比如低密度聚乙烯(LDPE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等聚合物,这些包装材料难以回收利用、难以生物降解,因此目前的功能性包装材料欠缺环保性,而且这些功能性食品包装多采用一些新型纳米材料,材料是否会迁移到食品当中,是否会对人体健康造成不良影响还不得而知,因此这些包装的安全性还有待进一步评估。

2.3 功能性食品包装难以商业化应用

虽然功能性食品包装能够发挥监测食品品质、抑菌、调控乙烯和生物可降解等功能,在食品的贮藏、保鲜和品质监测等方面发挥有利的作用,但是目前对于这些包装的研究还处于实验阶段,有的包装材料和功能性成分的价格较昂贵,导致生产成本较高;有的

加工工艺较为复杂,难以扩大生产;有的功能性包装存在潜在的安全性问题。由此,目前的功能性食品包装还难以应用到实际的食物保鲜贮藏中,对于这些功能性食品的商业化应用还有待进一步研究。

3 未来发展的趋势及展望

3.1 “诊疗一体化”应用于食品包装

“诊疗一体化”指在生物医学中将疾病的诊断或监测与治疗有机结合的新型医学技术,与单一功能的诊断或者治疗手段相比,诊疗一体化具有突出的优势。将“诊疗一体化”的概念运用到功能性食品包装上,即将食品的保鲜与品质监测功能于一体,一方面可以延长食品的货架期,另一方面还可以通过实时监测食品品质反馈包装的保鲜效果,这样不仅可以克服单一功能食品包装的缺点,而且更能体现功能性食品包装的智能性。由此可见,将“诊疗一体化”应用于食品包装将是未来的发展趋势之一。

3.2 功能性“生物可降解”复合包装的开发

鉴于当前对于环保的重视,不可降解、难回收的塑料包装材料在未来将会被生物可降解的环保型材料所取代,因此开发生物可降解的食品包装将是大势所趋。虽然现在已有许多生物可降解食品包装方面的报道,但是使用单一的聚合物导致包装的力学性能和阻隔性能较差,难以实际应用。将2种或2种以上的聚合物共混会改善包装材料的性能缺陷,或开发一些新型高性能的生物可降解包装材料。同时还可以添加具有生物活性的物质到包装材料中,赋予包装材料不同的功能特性。由此,研发功能性复合生物可降解包装是未来的发展趋势,同时还应考虑材料的成本和加工工艺。

3.3 功能性可食用包装膜的研发

可食用包装膜作为一种安全、绿色、无污染的包装材料,在食品领域有着巨大的发展潜力,其不仅具有可食特性,而且还具有安全无毒、绿色环保等特点。由于可食用包装材料具有热封性、耐水性、机械强度较差等缺陷,因此限制了其应用。若对可食用包装材料进行改性,以提升其机械强度、阻隔性能等,并将包装的一些功能(如抑菌、抗氧化、智能检测等)赋予可食用包装膜,功能性可食用包装膜在未来将具有广阔的发展前景。

3.4 冷链物流控温包装材料的开发

近些年来,我国农产品冷链物流迅速发展,但是相对于发达国家,我国的冷链物流体系具有不健全、基础设施不完善、技术水平较低等缺点。大部分生鲜

蔬菜等农产品的附加价值较低,使用冷链贮藏成本较高,流通过程缺乏有效的保鲜方法,导致损耗较为严重。控温包装通过蓄冷剂吸收热量来控制箱内温度,保持食品在物流过程中的品质,作为冷链系统的补充,是一种较为经济和实用的食品保鲜方式。由于目前控温包装材料大部分都是石油基发泡材料,存在成本高、难回收、难降解等问题,因此,对于新型控温包装材料的开发,以及延长生鲜蔬菜等食品的货架期具有重要研究意义,比如开发生物可降解发泡材料,利用新工艺制备环境友好的保温材料等方面具有良好的发展前景。

4 结语

人们生活水平的提高促进了食品包装材料与技术的不断创新,食品包装的创新对减少食物的浪费,提高产品质量,延长保质期,以及减少食品包装对环境的负面影响等方面具有很大的促进作用。食品包装的创新也致使多种多样的功能性食品包装被研发出来。与传统的食品包装相比,这些功能性食品包装具有更智能化、食品货架期更长等优势。由于目前功能性食品包装依然面临一些问题,比如包装材料的成本较高、加工工艺更加复杂,以及存在潜在的安全性问题等,难以商业化应用,因此开发绿色环保、价格低廉的多功能性复合包装,并将其应用于食品保鲜、品质监测等方面将具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] COLES R, KIRWAN M J. Food and Beverage Packaging Technology[M]. Hoboken: Wiley Online Library, 2011: 1—2.
- [2] MEI L, WANG Q. Advances in Using Nanotechnology Structuring Approaches for Improving Food Packaging[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2020, 11: 1—26.
- [3] KALPANA S, PRIYADARSHINI S R, MARIA LEENA M, et al. Intelligent Packaging: Trends and Applications in Food Systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 145—157.
- [4] RHIM J W, PARK H M, HA C S. Bio-nanocomposites for Food Packaging Applications[J]. Progress in Polymer Science, 2013, 38(10): 1629—1652.
- [5] 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.
- [6] EMANUEL N, SANDHU H K. Food Packaging Development: Recent Perspective[J]. Journal of Thin Films, Coating Science Technology and Application, 2020, 6(3): 13—29.
- [7] YAM K L, TAKHISTOV P T, MILTZ J. Intelligent Packaging: Concepts and Applications[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(1): R1—R10.
- [8] DA CRUZ R M S. Food Packaging: Innovations and Shelf-Life[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019: 65—66.
- [9] 王艳娟, 王桂英, 王艺萌. 食品类智能包装技术研究进展[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 6—12.
WANG Yan-juan, WANG Gui-ying, WANG Yi-meng. Research Progress of Food Intelligent Packaging Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 6—12.
- [10] 封晴霞, 王利强. 气体指示与纳米智能标签在食品包装中的发展综述[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 138—144.
FENG Qing-xia, WANG Li-qiang. Review on The Development of Gas Indicator Smart Label and Nanometer Intelligent Label in Food Packaging[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 138—144.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ZHANG J J, ZOU X B, ZHAI X D, et al. Preparation of an Intelligent pH Film Based on Biodegradable Polymers and Roselle Anthocyanins for Monitoring Pork Freshness[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 306—312.
- [14] KIM J, CAMPBELL A S, DE ÁVILA B E-F, et al. Wearable Biosensors for Healthcare Monitoring[J]. Nature Biotechnology, 2019, 37(4): 389—406.
- [15] MAHALIK N P, NAMBIAR A N. Trends in Food Packaging and Manufacturing Systems and Technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(3): 117—128.
- [16] YOUSEFI H, SU H M, IMANI S M, et al. Intelligent Food Packaging: a Review of Smart Sensing Technologies for Monitoring Food Quality[J]. ACS Sensors, 2019, 4(4): 808—821.
- [17] DEISINGH A K, THOMPSON M. Detection of Infectious and Toxigenic Bacteria[J]. Analyst, 2002, 127(5): 567—581.
- [18] ZHONG M, YANG L, YANG H, et al. An Electrochemical Immunobiosensor for Ultrasensitive Detection of Escherichia coli O157: H7 Using CdS Quantum Dots-encapsulated Metal-organic Frameworks as Signal-amplifying Tags[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 126: 493—500.
- [19] MAHMOUDPOUR M, DOLATABADI J E N, TORBATI M, et al. Nanomaterials and New Biorecognition Molecules Based Surface Plasmon Resonance

- Biosensors for Mycotoxin Detection[J]. *Biosensors Bioelectronics*, 2019, 111603: 1—14.
- [20] LIN F, BAO Y W, WU F G. Carbon Dots for Sensing and Killing Microorganisms[J]. *Journal of Carbon Research*, 2019, 5(2): 33.
- [21] INBARAJ B S, CHEN B H. Nanomaterial-based Sensors for Detection of Foodborne Bacterial Pathogens and Toxins as Well as Pork Adulteration in Meat Products[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2016, 24(1): 15—28.
- [22] YOO S M, LEE S Y. Optical Biosensors for the Detection of Pathogenic Microorganisms[J]. *Trends in Biotechnology*, 2016, 34(1): 7—25.
- [23] YOUSEFI H, ALI M M, SU H-M, et al. Sentinel Wraps: Real-time Monitoring of Food Contamination by Printing DNAzyme Probes on Food Packaging[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 3287—3294.
- [24] WEN Y N, LI Y, SI Y, et al. Ready-to-use Strip for L-ascorbic Acid Visual Detection Based on Polyaniline/Polyamide 66 Nano-fibers/nets Membranes[J]. *Talanta*, 2015, 144: 1146—1154.
- [25] BIBI F, GUILLAUME C, GONTARD N, et al. A Review: RFID Technology Having Sensing Aptitudes for Food Industry and Their Contribution to Tracking and Monitoring of Food Products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 62: 91—103.
- [26] 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.
- [27] FIDDES L K, YAN N. RFID Tags for Wireless Electrochemical Detection of Volatile Chemicals[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 186: 817—823.
- [28] 郭虹, 杨铨. RFID 技术原理及在酒类产品防伪包装中的应用[J]. *包装世界*, 2010(6): 16.
GUO Hong, YANG Lai. The Principle of RFID Technology and Its Application in Anti-counterfeiting Packaging of Alcoholic Products[J]. *Packaging World*, 2010(6): 16.
- [29] 施申伟, 李婷, 东为富. 食品抗菌包装研究进展[J]. *塑料包装*, 2018, 28(4): 1—8.
SHI Shen-wei, LI Ting, Dong Wei-fu. Research Progress of Antibacterial Packaging for Food[J]. *Plastic Packaging*, 2018, 28(4): 1—8.
- [30] 马超, 吴瑛. 抗菌剂抗菌机理简述[J]. *中国酿造*, 2016, 35(1): 5—9.
MA Chao, WU Ying. Antimicrobial Agents and Their Mechanism of Actions[J]. *China Brewing*, 2016, 35(1): 5—9.
- [31] AZEREDO H M C, OTONI C G, CORRÊA D S, et al. Nanostructured Antimicrobials in Food Packaging—Recent Advances[J]. *Biotechnology Journal*, 2019, 14(12): 1900068.
- [32] WU J H, LI F Y, HU X, et al. Responsive Assembly of Silver Nanoclusters with a Biofilm Locally Amplified Bactericidal Effect to Enhance Treatments against Multi-Drug-Resistant Bacterial Infections[J]. *ACS Central Science*, 2019, 5(8): 1366—1176.
- [33] SARWAR M S, NIAZI M B K, JAHAN Z, et al. Preparation and Characterization of PVA/Nanocellulose/Ag Nanocomposite Films for Antimicrobial Food Packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 184: 453—464.
- [34] CAI J S, HUANG J Y, WANG S C, et al. Crafting Mussel-Inspired Metal Nanoparticle-decorated Ultrathin Graphitic Carbon Nitride for the Degradation of Chemical Pollutants and Production of Chemical Resources[J]. *Advanced Materials*, 2019, 1806314: 1—11.
- [35] CAO C J, HUANG J C, LI L, et al. Highly Dispersed Ag/TiO₂ via Adsorptive Self-assembly for Bactericidal Application[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(22): 13347—13352.
- [36] LI L, ZHAO C J, ZHANG Y D, et al. Effect of Stable Antimicrobial Nano-silver Packaging on Inhibiting Mildew and in Storage of Rice[J]. *Food Chemistry*, 2017, 215: 477—482.
- [37] KIM I, VISWANATHAN K, KASI G, et al. Poly (Lactic acid)/ZnO Bionanocomposite Films with Positively Charged ZnO as Potential Antimicrobial Food Packaging Materials[J]. *Polymers*, 2019, 11(9): 1427.
- [38] 李梅. 一种具乙烯清除和抗菌功能的果蔬保鲜包装膜研发[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 46—47.
LI Mei. The Development of Fresh-keeping Packaging Film with the Function of Ethylene Scavenging and Antimicrobial for Fruit and Vegetable[D]. Wuxi: JiangNan University, 2016: 46—47.
- [39] ECHEGOYEN Y, NERIN C. Nanoparticle Release from Nano-silver Antimicrobial Food Containers[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, 62: 16—22.
- [40] ZORRAQUÍN-PEÑA I, CUEVA C, BARTOLOMÉ B, et al. Silver Nanoparticles against Foodborne Bacteria. Effects at Intestinal Level and Health Limitations[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(1): 132.
- [41] AYDIN A, DEMIRCI F, ORHAN M, et al. Preparation of Breathable Polyurethane Membranes with Quaternary Ammonium Salt Diols Providing Durable Antibacterial Property[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(9): 47133.
- [42] MIN T T, ZHU Z, SUN X L, et al. Highly Efficient Antifogging and Antibacterial Food Packaging Film Fabricated by Novel Quaternary Ammonium Chitosan Composite[J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125682.
- [43] LIU M, WANG F, LIANG M G, et al. In Situ Green Synthesis of Rechargeable Antibacterial N-halamine Grafted Poly(Vinyl Alcohol) Nanofibrous Membranes for Food Packaging Applications[J]. *Composites Communications*, 2020, 17: 147—153.

- [44] DEL NOBILE M A, LUCERA A, COSTA C, et al. Food Applications of Natural Antimicrobial Compounds[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 287.
- [45] TANG Y D, ZHOU Y, LAN X Z, et al. Electrospun Gelatin Nanofibers Encapsulated with Peppermint and Chamomile Essential Oils as Potential Edible Packaging[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(8): 2227—2234.
- [46] YADAV S, MEHROTRA G K, BHARTIYA P, et al. Preparation, Physicochemical and Biological Evaluation of Quercetin Based Chitosan-gelatin Film for Food Packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 227: 115348.
- [47] 王利强, 马学芬, 游柳青, 等. 添加 β -CD-反式-2-己烯醛微胶囊聚乳酸膜的性能研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(17): 17067—17070.
WANG Li-qiang, MA Xue-fen, YOU Liu-qing, et al. Effect of Adding Microcapsule into Polyactic Acid Film on Properties[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(17): 17067—17070.
- [48] 郝喜海, 孙淼, 邓靖, 等. 丁香精油- β -环糊精包合物的缓释抗菌性能[J]. *食品科学*, 2012, 33(11): 86—88.
HAO Xi-hai, SUN Miao, DENG Jing, et al. Slow-Released Antibacterial Properties of Clove Essential Oil Inclusion Complex[J]. *Food Science*, 2012, 33(11): 86—88.
- [49] LI Z H, BEHRENS A M, GINAT N, et al. Biofilm-Inspired Encapsulation of Probiotics for The Treatment of Complex Infections[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(51): 1803925.
- [50] ZHAO J Y, WEI F, XU W, et al. Enhanced Antibacterial Performance of Gelatin/chitosan Film Containing Capsaicin Loaded MOFs for Food Packaging[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 510: 145418.
- [51] HU B X, SUN D-W, PU H B, et al. Recent Advances in Detecting and Regulating Ethylene Concentrations for Shelf-life Extension and Maturity Control of Fruit: A Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 66—82.
- [52] PATHAK N, CALEB O J, GEYER M, et al. Photocatalytic and Photochemical Oxidation of Ethylene: Potential for Storage of Fresh Produce—a Review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(6): 982—1001.
- [53] WILSON M D, STANLEY R A, EYLES A, et al. Innovative Processes and Technologies for Modified Atmosphere Packaging of Fresh and Fresh-cut Fruits and Vegetables[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(3): 411—422.
- [54] SUN B X, CHEN X, XIN G, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on Quality of Button Mushrooms (*Agaricus Bisporus*) Packaged in Different Packaging Materials[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 159: 111023.
- [55] CHENG G P, YANG E, LU W J, et al. Effect of Nitric Oxide on Ethylene Synthesis and Softening of Banana Fruit Slice during Ripening[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(13): 5799—5804.
- [56] GE Y, HU K-D, WANG S-S, et al. Correction: Hydrogen Sulfide Alleviates Postharvest Ripening and Senescence of Banana by Antagonizing The Effect of Ethylene[J]. *Plosone*, 2018, 13(1): e0191351.
- [57] ZHOU H W, YUAN B, CHEN W, et al. Effect of Monooxygenase Purified from *Mycobacterium JS60* Combined with Sodium Alginate on The Preservation of Banana[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161: 111079.
- [58] KAEWKLIN P, SIRIPATRAWAN U, SUWANAGUL A, et al. Active Packaging from Chitosan-titanium Dioxide Nanocomposite Film for Prolonging Storage Life of Tomato Fruit[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 112: 523—529.
- [59] PISANO R, BAZZANO M, CAPOZZI L C, et al. Controlled Release of Ethylene via Polymeric Films for Food Packaging[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2015, 1695(1): 020009.
- [60] 陈亚婷, 韩祥稳, 周游, 等. 乙烯利缓释包装材料对香蕉后熟品质的影响[J]. *食品科学*, 1—11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200109.1112.040.html>.
CHEN Ya-ting, HAN Xiang-wen, ZHOU You, et al. Effect of Ethephon Slow-release Packaging Material on Ripening Quality of Bananas[J/OL]. *Food Science*, 1—11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200109.1112.040.html>.
- [61] CAPOZZI L C, BAZZANO M, CAVALLERO M C, et al. Polymeric Supports for Controlled Release of Ethylene for Food Industry[J]. *International Polymer Processing*, 2016, 31(5): 570—576.
- [62] LI H, HE Y Q, YANG J, et al. Fabrication of Food-safe Superhydrophobic Cellulose Paper with Improved Moisture and Air Barrier Properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 211: 22—30.
- [63] GHANEM A F, YOUSSEF A M, REHIM M H A. Hydrophobically Modified Graphene Oxide as a Barrier and Antibacterial Agent for Polystyrene Packaging[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(11): 4685—4700.
- [64] KIM T, TRAN T H, HWANG S Y, et al. Crab-on-a-Tree: All Biorenewable, Optical and Radio Frequency Transparent Barrier Nanocoating for Food Packaging[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 3796—3805.
- [65] SANGRONIZ A, ZHU J B, TANG X, et al. Packaging Materials with Desired Mechanical and Barrier Properties and Full Chemical Recyclability[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1—7.
- [66] SIRACUSA V, ROCCULI P, ROMANI S, et al.

- Biodegradable Polymers for Food Packaging: a Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(12): 634—643.
- [67] MUTHURAJ R, MISRA M, MOHANTY A K. Biodegradable Compatibilized Polymer Blends for Packaging Applications: a Literature Review[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(24): 45726.
- [68] 肖玮, 孙智慧, 刘佳, 等. 生物降解食品包装材料的
研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 216—218.
XIAO Wei, SUN Zhi-hui, LIU Jia, et al. Review of Biodegradable Food Packaging Materials[J]. Food Industry, 2018, 39(1): 216—218.
- [69] MASMOUDI F, BESSADOK A, DAMMAK M, et al. Biodegradable Packaging Materials Conception Based on Starch and Polylactic Acid (PLA) Reinforced with Cellulose[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(20): 20904—20914.
- [70] GÓMEZ-ALDAPA C A, VELAZQUEZ G, GUTIERREZ M C, et al. Effect of Polyvinyl Alcohol on the Physicochemical Properties of Biodegradable Starch Films[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 239: 122027.