

生物基活性食品包装材料的研究进展

安艳霞*, 刘 欣, 雷永伟, 李琳琳, 张 剑

(河南农业大学食品科学技术学院, 郑州 450002)

摘 要: 传统的塑料食品包装材料大多来自于不可再生的石化资源, 难以降解, 不仅造成白色污染, 且包装中的某些成分迁移至食品中也给食品安全带来负面影响。随着对“双碳目标”的认知和食品安全关注度的提升, 绿色、安全、可降解同时可延长食品的保质期的生物基活性包装材料成为研究热点。本文从活性剂的类型和活性包装的功能角度介绍了生物基活性基材的类型和特点, 综述了基于淀粉、纤维素、壳聚糖、蛋白质、聚乳酸等生物基材的活性食品包装材料的研究现状, 对比分析不同类型生物基活性包装的优势和弊端, 探讨各生物基食品活性包装材料存在的问题及解决的对策, 最后对未来生物基活性包装的应用和研究趋势进行展望, 以为开发和选用绿色环保、性能优良、使用安全的生物基活性食品包装提供参考。

关键词: 生物基材料; 活性食品包装; 可降解; 抗菌; 抗氧化

Advance in bio-based active food packaging materials

AN Yan-Xia*, LIU Xin, LEI Yong-Wei, LI Lin-Lin, ZHANG Jian

(College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: Most of traditional plastic food packaging materials come from non-renewable petrochemical resources and are difficult to be degraded, which not only cause white pollution, but also bring negative impacts on food safety when some components in the packaging migrate into the food. With the increasing awareness of the “double carbon target” and attention on food safety, green, safe, degradable, and biobased active packaging materials have become a hot research topic, which can extend the shelf life of food. This paper introduced the types and characteristics of bio-based active substrates from the perspective of the types of active agents and the function of active packaging, reviewed the research status of active food packaging materials based on starch, cellulose, chitosan, protein, polylactic acid, etc., compared and analyzed the advantages and disadvantages of different types of active food packaging, and discussed the existing problems and solutions of bio-based food active packaging materials. Finally, this paper prospected the future application and research trend of bio-based active packaging, in order to provide references for the development and adoption of green, environmental-friendly, excellent performance, and safe use of bio-based active food packaging.

KEY WORDS: bio-based materials; active food packaging; biodegradable; antibacterial; antioxidation

基金项目: 国家自然科学基金项目(21706052、22278114)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21706052, 22278114)

*通信作者: 安艳霞, 博士, 副教授, 主要研究方向为谷物化学、农产品加工副产物的综合利用。E-mail: yanxiaan@henau.edu.cn

*Corresponding author: AN Yan-Xia, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, No.63 Nongye Road, Jinshui District, Zhengzhou 450002, China. E-mail: yanxiaan@henau.edu.cn

0 引言

食品包装是供应链中保护食品免受微生物污染和环境影响的关键策略^[1]。随着消费者对安全、健康和高质量食品的需求不断增加, 包装的传统角色正在不断转变以应对不断变化的市场需求^[2]。传统包装例如塑料包装因质量轻、经济耐用及成熟的工艺而广泛应用于诸多领域。然而, 塑料制品大多来源于不可再生的石化资源, 难以降解, 过度使用将破坏人类与自然之间的和谐, 带来的“白色污染”等问题受到人们的高度关注。同时, 传统包装难以维持食品的新鲜度, 包装材料中的化工成分或有害物质不可避免地接触到食品表面并向其内部产生化学迁移等问题, 将给食品安全带来不良影响^[3]。此外, 由于不可再生资源的枯竭和环境污染的加剧, 开发可再生、可降解、环境友好型的生物基材料来替代传统的合成塑料包装已成为当今食品包装领域的共识。事实上, 众多国家颁布了“限塑令”, 提倡绿色可持续包装替代塑料包装, “绿色、环保、智能”可持续包装已成为包装行业的发展方向, 也是助力“双碳目标”, 实现和推进“禁塑令”“限塑令”政策实施的重要途径。

食品变质除受外界环境因素影响外, 还与本身的微生物、内源酶和脂质氧化有关, 活性包装正是针对上述因素引起品质劣变设计和构建的, 可以指示食品是否变质的新型包装技术, 确保食品安全性、新鲜度和完整性^[1]。与传统的直接向食品中添加活性剂(如抗菌剂和抗氧化剂)相比, 将活性剂添加到活性包装中可以减少活性剂用量,

同时避免这些物质与食品成分发生反应^[2]。生物基聚合物具有生物降解性、无毒性、低成本和易获得性等优势, 在生鲜农产品等食品包装领域前景广阔。基于纤维素、淀粉、蛋白质、甲壳素(壳聚糖)等天然生物聚合物资源为基材, 将活性剂与上述材料结合, 通过共混改性、稳态成型等技术手段制备具有一定功能特性的活性包装, 在延缓食物品质劣变, 延长食品的货架期的同时, 也契合“绿色、环保、智能”可持续包装的特点^[4]。本文综述了现有生物基活性剂的类型及基材来源, 对比分析不同类型包装的优缺点, 并对其未来发展趋势做出展望, 为绿色环保的新型生物基食品包装的开发和设计提供新的思路 and 方向, 同时为人们选择食品包装材料提供一定参考。

1 活性剂类型

包装在食品加工及流通环节中起着极为重要的作用, 是延缓食物变质的保护层^[5]。传统的“惰性包装”是采用物理阻隔外部环境因素的方式保持食品固有品质^[6]。随着消费者对食品健康安全要求的不断提高, 食品包装被要求赋予新的功能, 活性包装应运而生。活性包装是通过将活性剂加入聚合物基材中, 活性剂持续从包装基材中释放出来, 以改善或调节样品周围环境, 降低外界环境与食品组分发生反应的程度, 抑制微生物生长和酶促反应的发生, 从而提高食品的保藏性和安全性, 达到长期维持食品品质的目的^[7-8]。活性剂主要有除氧剂、除湿剂、抗紫外线、抗菌剂、抗氧化剂等类型, 如图 1 所示^[9]。

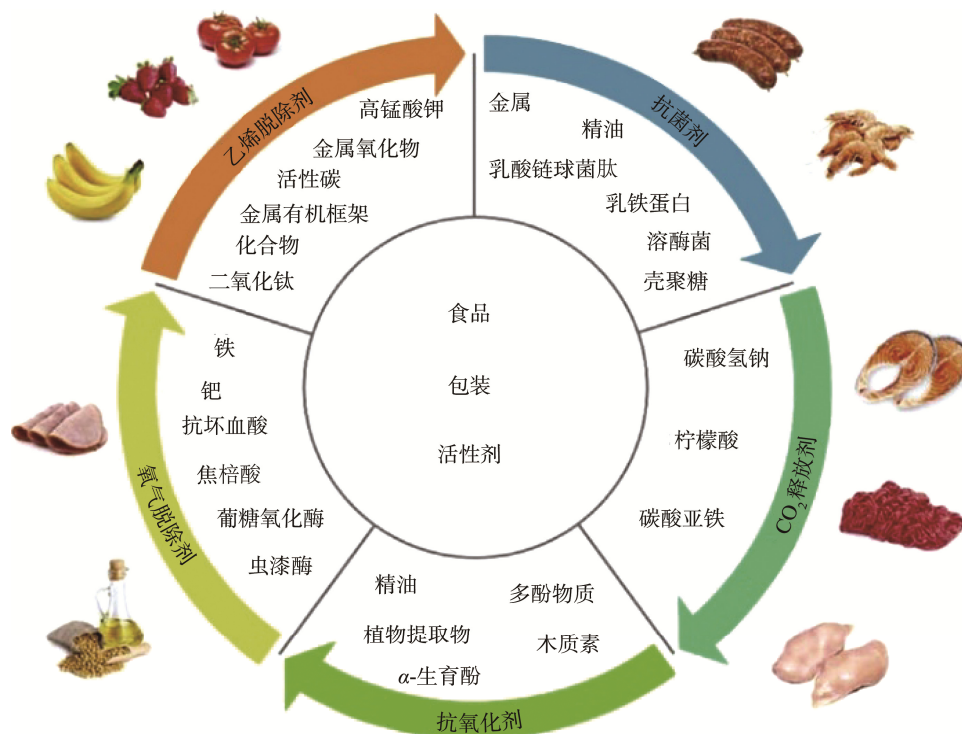


图1 生物活性剂在食品包装中的应用^[9]

Fig.1 Application of bioactive agents in food packaging^[9]

根据活性剂的作用机制, 活性包装被分为“吸收型”、“释放型”和其他类型^[9]。“吸收型”是通过吸收食品及其内外部环境中对食品不良影响的物质, 例如水分、氧气、二氧化碳及异味等; 而“释放型”则是通过活性剂迁移或缓释抗氧化剂、抗菌剂等活性剂释放到包装内或食品表面以延缓食品的变质速度。不同类型的活性包装在面制品、肉制品及果蔬类食品中已有广泛应用(表 1)。

1.1 除氧及除湿活性剂

食品所在环境中的水分含量(活度)和氧气等是导致食品品质劣变的主要因素之一^[10]。活性除氧剂或除湿剂可有效去除流通和保藏过程中食品周围的氧气、水分等成分。对于氧气敏感的食品, 例如牛奶、果汁及蔬菜汁、熟肉制品、糕点等, 通常需选择对氧气具有高阻隔性的包装以清除食品周围的渗透氧、顶空氧和溶解氧, 然而传统包装很难达到绝对的低氧环境。常见的除氧剂有无机和有机除氧剂。无机除氧剂有铁系、亚硫酸盐系、加氢催化剂型等类型, 有机除氧剂有抗坏血酸类、儿茶酚类、葡萄糖氧化酶和维生素 E 类等。其中铁系除氧剂具有价廉易得、性能优异等优点, 目前, 已有研究开发出含纳米金属的除氧剂并用于活性包装中^[11]。例如 MU 等^[12]在微乳液体系中通过液相还原法得到的铁纳米颗粒, 其除氧速率竟是传统铁系除氧剂的 9 倍多, 应用在烤葵花籽和核桃仁包装上, 结果证实了其超强的抑制脂质氧化能力, 在对氧气敏感的食品活性包装应用中潜力巨大。水分含量高易滋生微生物, 还可能导致产品外观、色泽、感官等的改变, 缩短保质期^[13]。尤其是干燥类型的食品, 在贮存及流通过程中对湿度极为敏感, 外界环境湿度升高极易导致其品质快速下降, 通常将干燥剂或除湿剂直接置入包装袋中, 或选用除湿型的活性包装以吸收食品周围环境的水分或阻止外部水分的侵入, 常见的有硅胶、硅酸、黏土、沸石、湿润剂盐(氯化钠、氯化镁、硫酸钙等)及山梨糖醇等干燥剂或除湿剂。然而值得

注意的是, 像面包和糕点等焙烤类食品及蔬菜、水果等食物, 水分的挥发或流失将影响其食用性, 通常选用防水型或阻水型的包装。综上, 不同类型的食品对包装的要求各异, 需根据需求选择对应的干燥剂或活性包装材料。

1.2 抗菌活性剂

抗菌活性包装是以高分子聚合物为载体, 将具有抗菌性能的活性剂导入包装基材中^[14]。该类型包装是通过减少、抑制或延迟食品中或包装内可能存有的微生物生长, 以保持食品的品质和安全性。常见的抗菌剂根据来源分为三大类: 天然抗菌剂、有机抗菌剂和无机抗菌剂。

天然抗菌剂通常是从动植物体内提取或微生物合成的一些天然物质, 主要有壳聚糖、细菌素、溶菌酶及植物精油等。与其他两类相比, 安全系数相对高且具有广谱性, 属于理想的抗菌剂。然而, 其缺点是稳定性一般不佳, 加热条件下易分解, 有效期与其他两类抗菌剂相比较短。关于天然抗菌剂的开发及稳定性研究, 将是未来抗菌活性剂的研究重点之一。有机抗菌剂主要包括醇类、酚类、季铵盐类、卤化物类、赛酚类、双胍类、二苯醚类、吡啶类、咪唑类、有机金属和有机氮类化合物等来源广泛、工艺简单、色泽好、价格低, 抗菌效果往往优于天然抗菌剂, 但有机类抗菌剂在加热或酸碱性条件下易发生性能改变, 影响抗菌性能的同时还存有健康隐患, 应用于食品包装时, 其安全性常受到质疑^[15]。无机抗菌剂包括金属纳米颗粒(Ag、Cu 纳米颗粒等)和金属纳米氧化物(ZnO、TiO₂、SiO₂等), 与其他抗菌剂相比, 无机抗菌剂具有抗菌范围广、效果优、抗菌时效长等优势。但含金属纳米颗粒的无机抗菌剂也存在一定缺陷^[16], 例如金属纳米颗粒可能会迁移至食品内部, 具有潜在危害性, 用于接触式食品包装时受限, 另外, 其制备成本高, 工艺较为复杂, 此外, 金属纳米颗粒引入后, 包装材料透明度下降、易变色、易氧化等局限性也限制了其进一步发展和应用。

表 1 活性包装在食品中的应用
Table 1 Application of active packaging in food

类型	种类	食品的类型	应用的目的
吸附型	除氧剂	(切片)熟肉制品; 磨碎的奶酪、(半烤的)烘焙产品; 水果和蔬菜汁; 种子、坚果和油、含脂速溶粉、油炸食品、肉干制品	防止变色 防止霉菌生长 保持维生素 C 含量, 防止褐变 防止酸败
	除湿剂	蘑菇、西红柿、草莓、玉米、谷物、种子、鲜鱼和鲜肉类	通过调节水分含量延长保质期、减少包装中的水分凝结、减少褐变或变色
	乙烯吸收剂	水果和蔬菜	延缓成熟和衰老, 提高品质和延长保质期
	抗氧化剂	新鲜含脂肪高的鱼类和肉类; 含脂速溶粉; 种子、坚果和油; 油炸产品	提高氧化稳定性
释放型	二氧化碳释放剂	新鲜鱼类、肉类	延长保质期, 减少气调包装的顶空体积
	抗菌包装系统	肉类、鲜鱼和熏鱼、海鲜、乳制品、水果和蔬菜、谷物、谷物和烘焙产品、即食食品	抑制或延缓细菌生长, 延长保质期

1.3 抗紫外线活性剂

紫外线是波长为 400 nm 以下的电磁波, 有优异的杀菌性能, 但紫外线能量高, 通常给食品带来不良影响, 长时间紫外线辐射将引起食品中油脂成分氧化及色素分解、包装材料老化等现象, 最终导致食品品质劣变^[17]。抗紫外线包装主要是添加紫外吸收剂于包装基材中^[18]。紫外吸收剂主要有合成类型的有机紫外吸收剂、无机紫外阻滞剂和天然的紫外吸收剂^[11]。传统的有机紫外吸收剂有二苯甲酮类及苯并三唑类等, 然而其在聚合物中会出现聚集和迁移, 对人类健康或环境均存在不良影响^[19]。无机紫外阻滞剂有 TiO₂、ZnO 等金属氧化物纳米颗粒, 添加无机紫外阻滞剂的包装材料具有较好的抗紫外线的性能和一定的透明性, 但是纳米粒子制备过程较为复杂、成本高, 大规模的商业化应用仍存在阻碍^[20]。因此, 具有抗紫外线性质的天然紫外吸收剂引起了学者们的极大兴趣。常见的天然紫外吸收剂有木质素、植物单宁等。木质素是世界上储量最多的芳香族化合物, 富含酚羟基、酮基等基团, 是天然的紫外阻隔剂, 可屏蔽几乎所有的紫外线, 同时木质素具有良好的生物相容性, 其在抗紫外线活性包装中应用前景广阔^[21-22]。随后一些绿色具有抗紫外线功能的复合膜也相继开发出来。XIONG 等^[23]采用延流法将木质素纳米球和聚乙烯醇制备成纳米复合膜, 与木质素/聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)膜相比, 机械强度高, 且具有良好的吸收紫外线性能, 适于食品和医药等的包装。

但目前, 抗紫外线活性包装与食品直接接触时, 紫外吸收剂是否向食品内部尤其是向含脂食品中迁移目前尚未有明确的定论, 该类活性剂的安全性还有待于深入研究。

1.4 抗氧化活性剂

含有不饱和脂肪酸的食品长期存放或受外界环境影响易发生脂质氧化, 进而引起食品变质。为了减少脂质氧化对食品造成的不良影响, 通常在食物中直接添加抗氧化剂或使用具有抗氧化活性的包装。直接添加抗氧化剂的方式下, 抗氧化剂被消耗后抗氧化作用将停止, 食品的氧化速度与抗氧化剂存在时相比有一定程度的增加, 另外抗氧化剂与食品直接接触是否存在危害或产生不良影响有待于进一步的研究^[24-25]。相比之下, 抗氧化性活性包装则可长时间维持食品品质, 同时抗氧化剂与食品无直接接触, 安全系数相对高。抗氧化活性剂在包装中的作用方式有两种: 一是向食品周围环境中释放抗氧化剂, 二是清除来自于食品和包装环境内的组分如氧气、自由基等。抗氧化剂据来源分为天然抗氧化剂和合成类抗氧化剂。

天然抗氧化剂是从天然物质中提取, 多数来源于果蔬类、中草药类、海藻类等天然物质中, 主要有维生素 C、维生素 E、类胡萝卜素、单宁、姜黄素、花青素和多酚化

合物等^[13]。与合成抗氧化剂相比, 消费者更青睐于天然抗氧化活性剂, 究其原因其安全性能相对较高。近些年, 天然抗氧化剂及绿色可降解的活性包装倍受消费者推崇, 故开发高效的天然抗氧化型生物基活性包装将是未来研究热点之一。合成抗氧化剂是通过化学或生物技术手段合成的, 具有成本低、使用方便等优点, 常见的合成抗氧化剂有丁基羟基甲苯、叔丁基对苯二酚和丁基化羟基茴香醚等, 在国家规定标准范围内可作为食品添加剂使用, 但其安全性仍被消费者质疑, 例如迁移至食品中或长期使用是否对健康产生不利影响等尚未有定论^[26]。

由于食品是多种组分构成的复杂体系, 活性包装的开发需综合考虑被包装食品的类型、化学组成和理化特性等, 以及活性剂的类型、活性剂的添加对包装材料性能的影响、包装后的食品流通及贮存条件等因素。活性包装在维持食品品质、延长货架期等方面具有明显优势, 然而实际应用中尚存在一些问题。例如一些活性剂引入包装基材后在维持食品品质的同时也带来了不愉悦的味道, 对食品的感官带来不良影响, 另外关于活性剂在包装材料中的迁移和作用机制尚不明确, 是否存在潜在的安全隐患有待于进一步研究。此外, 在成本方面活性包装高于传统包装。随着材料科学、食品科学、生物化学和微生物学等交叉学科的不断发展, 活性剂的研究尽管取得了阶段性进展, 但存在功能性单一、抗氧化抗菌剂利用率不高、保鲜效果参差不齐等问题。如何确保食品安全和品质的同时, 提升消费者的认可度, 在成本、绿色可降解、规模化及标准化方面, 寻求合适的活性剂、不同类型及不同来源活性剂的引入对包装效果的影响机制仍是当前活性包装研究过程中亟待解决的关键问题。

2 生物基活性包装材料

2.1 淀粉基包装材料

淀粉来源广泛, 产量极为丰富, 成本低, 具有优异的生物降解性。淀粉基包装材料多以膜的形式存在, 制备过程中涉及淀粉的塑化和抗菌剂的引入。纯淀粉基膜往往存在机械强度弱、阻隔性差、对水亲和力高等缺陷, 可添加甘油、山梨醇、木糖醇或多元醇等物质使其塑化, 再通过挤压或铸造形成聚合物膜, 即热塑性淀粉(thermoplastic starch, TPS), 作为包装材料使用^[27]。通过引入纳米黏土、碳纳米管、羧甲基纤维素(carboxymethylcellulose, CMC)、微晶纤维素等制备淀粉基包装材料, 以改善其机械性能。例如 OJOGBO 等^[28]将纳米黏土与纤维素纳米晶作为填料引入酯化淀粉中, 通过浇铸法制备的复合膜拉伸强度显著增强, 提高幅度高达 173%。此外, 通过引入活性剂等可改善淀粉基膜的功能特性。例如徐梓轩等^[29]对比研究了纯淀粉和添加柠檬酸的淀粉复合膜的理化特性, 并将其用于芒

果的保鲜研究,发现柠檬酸的添加延长了芒果的保质期,柠檬酸与淀粉发生交联,淀粉分子链间由范德华力的结合转变为化学键的结合,促使分子间作用力增强,柠檬酸添加后淀粉膜的力学性能也有所提升,类似地,将儿茶素、花青素、百里香精油等活性剂添加于淀粉基材中,淀粉基膜的力学性能及其他功能特性均有明显的提高,从而进一步拓宽淀粉基材料的使用范围^[30]。

基于淀粉基质的食品活性包装使用目的,可引入活性剂的一种或几种,赋予包装一定的功能特性。常见的功能性淀粉膜有抗菌膜、抗氧化膜等,其中,抗菌膜的研究较为广泛,抗菌机制是将抗菌活性剂通过缓慢释放至食物被包围的环境中,持续与周围环境或食品组分发生作用,以抑制微生物滋生,防止或延缓食物的氧化变质^[31]。淀粉主要来源于薯类(马铃薯、甘薯等)和谷物类(玉米、大米及小麦等),根据选用包装的目的,选取适宜的活性剂^[32]。抗氧化膜研究中,NIASA 等^[33]将绿茶提取物添加于马铃薯淀粉中制备的淀粉膜用于牛肉的保鲜研究,结果表明该包装膜对水蒸气阻隔性好、对自由基有良好清除效果,对牛肉有良好的保鲜效果。类似地,SONG 等^[34]将丁香花蕾精油与薏米淀粉混合制备活性淀粉膜,成功用于五花肉的保鲜,与非活性包装的相比,丁香花蕾精油薄膜的光学性能并未下降,抗氧化活性有一定程度的提高,经该活性膜包装的五花肉氧化程度显著下降。DÉSIRÉ 等^[35]将抗坏血酸引入大米淀粉基材中,采用该活性包装膜包装含脂肪的食品进行模拟研究,发现该活性包装膜的抗氧化剂释放状况良好,有效地延缓了脂质氧化的速度。同样地,抗菌膜研究中,WU 等^[36]将茶叶中的儿茶素用于活性淀粉包装,与传统包装相

比,该活性包装膜可有效抑制微生物繁殖及防止油脂氧化。

基于淀粉或淀粉衍生物的功能性膜在应用中除了具备某些功能特性外,还需考虑其外在的美观性,例如一些抗菌剂的添加降低了抗菌膜的透明性或导致膜表面粗糙、色泽差等不良影响,从感官上对消费者造成负面影响。因此,未来亟待研发成本低、安全性高、抗菌效果好、机械性能优、外观美观的淀粉基活性包装。

2.2 纤维素基包装材料

纤维素在自然界中极为丰富,纤维素及其衍生物主要有纤维素、纳米纤维素和纤维素衍生物,因绿色无毒、加工性能好等优势,在包装材料、医疗等行业等均有应用。纤维素基包装材料的研究大多集中于安全性、生物相容性、降解性、机械性能和功能性等方面。传统的成熟造纸技术促使纤维素常以纸基的形式存在,与纸基包装相比,膜基包装轻盈且透明性好。近些年随着纤维素新型溶剂体系的出现,以纤维素为基材的功能性复合材料取得了较大的研究进展。例如 CAZON 等^[37]采用 NaOH/尿素低温溶剂体系制备了纤维素膜,然后将其浸泡于 1%壳聚糖、4%聚乙烯醇的混合液中,得到复合膜的透明度增加、抗紫外线性能增强,具有巨大的潜在使用价值。

随着纳米技术的发展,纳米纤维由于其较大的比表面积和活性剂的高负载能力而越来越多地用于活性食品包装,包括抗菌包装、抗氧化包装、乙烯去除包装、除湿包装等(图 2)^[38]。纳米纤维素主要包括纤维素纳米纤丝(cellulose nanofibers, CNF)、纤维素纳米晶体(cellulose nanocrystals, CNC)、细菌纤维素(bacterial cellulose, BC)^[39-40]。

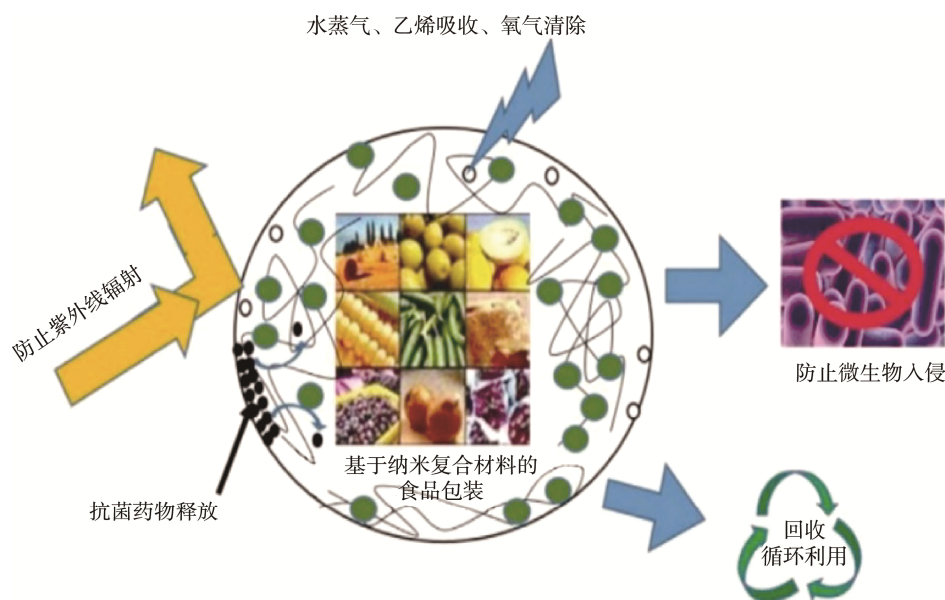


图2 基于生物纳米复合材料的活性食品包装^[38]

Fig.2 Active food packaging based on bio-nanocomposites^[38]

将抗菌剂引入至纳米级尺寸的纤维素中可得到纳米纤维素基活性材料, 该类材料具备抗菌性功能的同时又符合包装对强度的要求, 在食品包装和医疗等领域应用潜力巨大^[36]。抗菌性纤维素材料的制备时, 通常添加纳米银颗粒和山梨糖醇等抗菌物质, WANG 等^[41]将纳米银颗粒和 3% PVA 添加 BC 中, 采用流延法制备复合膜, 因 BC 致密的三维网络结构将氧气隔离在外, 同时纳米银有极佳的抗菌性能, 因此复合膜具有良好的阻氧性和抗菌性。类似地, YU 等^[42]将纳米银颗粒添加于 CNF 中, 采用 NaBH₄ 还原法成功制备了 AgNPs/CNF 材料, 在储存过程中, 材料中的纳米银离子缓慢释放, 有效抑制了大肠杆菌的生长。此外, SONI 等^[43]将山梨糖醇引入 CNC 中制备的复合膜可有效抑制菌落生长。

由于纤维素分子富含羟基基团, 通过醚化、酯化等反应可获得羟丙基纤维素、醋酸纤维素、羟乙基纤维素和 CMC 等纤维素衍生物, 从而扩大了纤维素的应用范围。MISSO 等^[44]采用单宁与纳米纤维素制备了可生物降解的纳米纤维素膜, 该膜具有优异的疏水性能和氧气阻隔性, 热稳定性高且具有良好的紫外屏蔽及抗氧化性能。类似地, 谭瑞心等^[45]将牛至精油添加于 CMC 中制备活性膜, 与未添加精油相比, 添加牛至精油的 CMC 包装膜抗氧化能力有显著提高, 可有效抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长, 防止食品变质。然而基于 CMC 的薄膜大部分具有耐水性差等缺陷, 在 CMC 的薄膜中引入其他活性剂, 可改善其性能^[46], 例如将磺酸盐木质素和碱木质素分别引入 CMC 基材中^[47]、有机木质素引入聚合物基材中^[48]制备复合膜, 结果发现引入木质素后均能明显改善复合膜的机械性能、抗紫外线、疏水性和拉伸强度等性能。

尽管围绕纳米纤维和纤维素衍生物的活性包装已开展了大量研究工作, 但大多数仍处于实验室研究阶段^[49]。为推进基于纤维的活性包装在食品行业的应用, 未来研究中需重点关注纳米纤维复合材料制备的效率、生产成本、提升纳米纤维机械性能和降解性、纳米纤维安全性系统评价等方向。

2.3 壳聚糖基包装材料

壳聚糖是甲壳素脱乙酰化后得到的天然氨基多糖, 具有良好的生物相容性、可降解性、成膜性和抗菌性等^[50]。甲壳素广泛存在于虾、蟹等海鲜产品的外壳中, 也存在于植物产品菌菇中, 例如蘑菇和高等真菌的细胞内^[51]。壳聚糖含有氨基和羟基, 其中, 氨基具有还原性, 可清除活性自由基; 羟基和金属离子会发生络合反应形成稳定的络合物, 有利于降低金属离子对食物的助氧化作用, 二者发生协同作用有助于其所制备的包装材料的抗氧化活性发挥^[52-53]。但纯壳聚糖膜机械性能、耐水性、抗菌性能等方面存在不足^[54], 故壳聚糖基复合材料的研究主要集中于增强其力学

性能和抗氧化、抗菌功能性等方面。RAMBABU 等^[55]将芒果叶提取物(mango leaf extract, MLE)用于壳聚糖膜的制备并用于腰果保鲜研究, 发现随 MLE 添加量的增加, 该包装膜的机械强度和阻水性能均有提升, 与传统聚乙烯材料相比, 该包装膜对腰果抗氧化效果更胜一筹。类似地, 闫安等^[56]将添加茶多酚的壳聚糖膜用于薇菜保鲜, 发现与未添加茶多酚组相比, 添加茶多酚的壳聚糖膜可使薇菜的保鲜时间延长 5~7 d, 且薇菜中可溶性糖损失大大降低。此外, LAN 等^[57]将海藻酸钠添至壳聚糖中制备的包装膜具有出优异的抗菌性能, 对大肠杆菌抑制率高达 93.4%, 同时具有高拉伸强度和伸长率。除用于果蔬包装外, 壳聚糖基包装材料在肉制品中的应用也有报道, 天然的提取物例如多酚, 拥有良好的抗菌特性, 可作为抗菌剂使用^[58]。YONG 等^[59]发现与纯壳聚糖膜对比, 添加紫米多酚的壳聚糖复合膜具有更强的自由基清除效果。类似地, 王倩等^[60]发现与对照组相比, 采用冬凌草甲素/壳聚糖复合膜包装, 鸡肉保质期延长了 5 d, 有效保持了鸡肉的品质、外观色泽等感官特性。

然而, 壳聚糖通常只溶于烯醇酸溶液, 机械性能差, 应用于纳米纤维类食品包装时受到限制^[61-62]。由于壳聚糖线性链的硬度和阳离子基团之间的排斥力, 纯壳聚糖难以制成纳米级溶液^[63]。针对上述问题, 学者们开始着手对壳聚糖进行改性研究, 获得了壳聚糖衍生物, 例如羧甲基壳聚糖、三元壳聚糖、羧烷基壳聚糖和 *n*-亚甲基磷壳聚糖^[64]。这些壳聚糖衍生物也被广泛用于制备活性纳米纤维食品包装。例如 DUAN 等^[65]以普鲁兰纳米纤维为核心层, 羧甲基壳聚糖/聚氧化乙烯(polyethylene oxide, PEO)纳米纤维为壳层制备的封装含 Nisin 凝胶的核壳纳米纤维复合材料具有优异的抗菌活性。另外, SHEN 等^[66]通过将 PCL 作为纺丝助剂加入壳聚糖溶液中, 成功制备了具有抗菌活性和高导热性的氮化硼纳米片负载壳聚糖/PCL 纳米纤维。

壳聚糖基食品包装的研究对实现食品包装的安全性和生态环保具有重要意义。该领域尽管取得了一些进展, 但距离工业化生产和实际应用还有一定距离, 当前在壳聚糖衍生物的开发和膜制备技术方面存在挑战。未来需开发更多的壳聚糖衍生物以满足多样化食品包装的要求, 例如符合纳米级食品包装的需求。此外, 壳聚糖基薄膜制备技术需进一步优化改进, 目前有直接浇铸、涂膜、逐层组装和挤出法等, 制备方法不同, 获得的薄膜性能和应用场景也不尽相同。上述技术各有优缺点, 其中, 直接浇铸的膜厚度和性能均一, 但成膜时间长; 涂膜法简单易行, 无需复杂设备但喷涂的薄膜分布不均; 挤出法要求基质间亲和力强, 否则影响膜的机械性能。随着包装要求的不断升级, 制备技术也需更加精进与高效, 以满足机械包装的自动化和智能化的需求, 以便适于将来的大批量生产。因此, 研发新的壳聚糖衍生物和开发膜制备新技术是获得新型壳聚

糖基薄膜的重要研究方向之一。

2.4 蛋白质基包装材料

常见的蛋白质来源有植物蛋白和动物蛋白,植物蛋白主要有大豆蛋白、玉米蛋白、小麦面筋蛋白和花生蛋白等,动物蛋白有乳清蛋白、胶原蛋白等^[67]。蛋白质以纤维状和球状形态存在,由氨基酸通过肽键连接形成的高聚物^[68],与多糖基材料相比,由于其结构独特,基于蛋白质基包装材料具有抗张强度高、易降解、对氧气阻隔性好等优势。但是,与传统包装相比,纯蛋白膜的机械强度低且易细菌滋生,易引起食品腐败,应用范围有限,可将纯蛋白与其他材料共混改性制备复合膜,提升蛋白基膜的抗拉伸性、断裂伸长率等,以达到应用目的,常见的改性方法有物理法、化学法和酶法改性等^[69]。例如 XU 等^[70]利用丙三醇三缩水甘油醚和聚丙烯酰胺对大豆蛋白膜进行改性,研究表明改性后的大豆蛋白复合膜力学性能和耐水性均有提高。因此,通过蛋白基膜的改性或添加无毒副作用的具有抗菌性的活性剂制备蛋白基复合膜可有效解决上述问题。

不同类型蛋白质构成的活性包装膜性能差异显著。其中,大豆分离蛋白合成的膜具有良好的阻油性和阻氧性能,崔月婷等^[71]研究发现,添加葡萄糖的大豆蛋白复合膜可有效保留食品的风味。值得一提的是, WANG 等^[72]在碱性条件下将不同含量的单宁酸添加到大豆分离蛋白中制成膜,随单宁酸含量的增加,该类膜对紫外线的屏蔽效果增强,对氧气渗透率下降,对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除力提高,抗氧化性增强。玉米蛋白是玉米淀粉加工的副产物,具有可再生、生物相容性、水蒸气阻隔性和安全无毒特性,已被美国食品和药物管理局批准用于制备食品包装的基本原料^[73-74]。玉米蛋白具有较高的耐热性、疏水性和良好的成膜性,因此被广泛应用于生物医药和食品包装^[75]。NIU 等^[76]采用静电纺丝方法开发了肉桂精油-乙基纤维素/玉米醇溶蛋白材料,将其用于双孢蘑菇的包装,发现乙基纤维素提高了复合材料的耐水性,存储过程中双孢蘑菇的硬度基本无变化,质量有明显提高。另外,王海粟等^[77]将由丙二醇、柠檬酸添加于玉米醇溶蛋白成功制备了复合膜,并将其用于黄金梨的包装,结果表明该膜可明显降低黄金梨的呼吸速度,营养损失显著降低。COLUSSI 等^[78]将异硫氰酸烯丙酯包封的静电纺丝玉米蛋白纳米纤维用于草莓的包装,与未包装时相比,经包装的草莓重量未减轻,草莓的抗氧化活性和总花青素含量基本保持不变。

类似地,关于动物蛋白用于活性包装的研究也有报道,例如郑顺姬等^[79]将柠檬酸添加于角蛋白中制备的活性包装膜,与商业薄膜相比,该活性包装膜可明显延长胡萝卜的保质期。此外,由胶原蛋白制备的膜强度大、对氧气阻隔性好,例如曲文娟等^[80]通过超声辅助得到没食子酸改

性金枪鱼皮胶原蛋白-壳聚糖复合膜,并将该膜用于猪肉的包装研究,以褐变严重的未包裹猪肉相比,使用该膜包裹的猪肉色泽好,菌落数明显低于对照,可有效保持猪肉在贮藏期间的新鲜度。

目前,蛋白基包装材料的研究已从纯蛋白基材向复合蛋白材料转变。随着蛋白基膜研究的深入,将有更多的新型材料与蛋白复合制备新型的蛋白基复合膜,性能也将更佳。例如陈珊珊等^[81]以大豆分离蛋白为膜基材,添加葵花籽壳纳米纤维素和壳聚糖成功制备了共混可食膜,该膜的抗拉强度、断裂伸长率等性能均有明显改善。然而蛋白基复合材料在不同环境中应用时,稳定性可能发生变化,其变化规律和变化机制目前尚不明确,引起变化的材料内部分子间的相互作用有待于进一步探究。

2.5 聚乳酸包装材料

聚乳酸(poly(lactic acid, PLA)是利用玉米、小麦、水稻等天然植物及其根、茎、叶等有机废弃物为原料经发酵聚合形成的聚酯,又称为聚丙交酯,是近几年生物基包装材料研究的热点之一。自然条件下,PLA 可以自动水解,分子骨架断裂后生成分子量较低的组分,然后变成小分子的乳酸单体,最终降解成二氧化碳和水,重入生态循环,对环境无毒副作用,研究发现,由 PLA 构成的食品杯完全分解只需 60 d^[82]。此外 PLA 具有良好的机械加工性能和抗菌性能,并且光泽度和透明度高、易加工成型且成本较低^[83]。肖玮等^[84]发现纯 PLA 膜对西兰花有优异的保鲜效果,西兰花变黄速度得到延缓,样品固形物含量和叶绿素含量基本无变化,归因于 PLA 包装膜良好的呼吸抑制作用,可有效减少质量损失。此外,有关引入活性剂的 PLA 活性包装也有报道, YE 等^[85]制备了一系列茶多酚-PLA 包装膜用于樱桃研究,与纯 PLA 膜相比,添加茶多酚的-PLA 包装膜显著延长了樱桃的保质期,并且樱桃的质量损失明显下降。类似地,戴璐等^[86]采用流延法制备了牛至精油/PLA 活性包装材料,随牛至精油添加量的增加,包装膜的抗氧化性能提高。PLA 是抗氧化剂丁基化羟基茴香醚、丁基化羟基甲苯及叔丁基氢醌等的良好载体,制备的活性膜也具有优异的抗氧化性。例如 TURALIJA 等^[87]借助等离子技术对 PLA 表面进行改性制备了抗菌复合膜,该膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有明显的抑制作用。基于 PLA 的活性包装可广泛用于果蔬、肉类等食品的外包装,延长食物的保质期的同时,也有助于保护环境和实现“双碳”目标。

PLA 除具有优异的生物降解性外,还具有高于大部分可降解塑料的强度和模量,但韧性较差、易脆等特点又限制其在包装方面的广泛应用。研究发现添加纳米材料于 PLA 中是强化食品包装材料性能的有效途径之一^[88]。此外,关于 PLA 的二元体系改性和多元体系共混改性是近几年研究的热点^[89]。因此借助交联、共混、表面改性等技术手段,开发高性能的改性 PLA 薄膜极有必要。

3 结束语

新型生物基活性包装的研发符合绿色发展理念, 低碳包装、轻量化新型食品包装材料等更为环保, 符合可持续发展需求, 基于淀粉、纤维素、壳聚糖、蛋白质等天然物质的包装材料优势明显, 目前, 其在活性包装研究方面尽管取得一定成果, 但尚存在一些问题, 例如机械性能差、抗菌剂的添加导致部分材料的阻隔性能变差、外观变差等问题。针对不同类型食品对贮存条件及包装要求的差异, 生物基活性包装材料的研究可着眼于以下几方面: (1) 活性剂在生物基材中的释放及扩散动力学的机制需深入研究。尤其是复合材料中活性剂对包装材料稳定性的影响, 活性剂与复合材料组分间的作用机制的解析等, 将有助于认识活性剂释放及扩散的作用方式, 为后续活性包装性能的优化及安全性能评估提供思路及策略。(2) 生物基活性包装材料的生产能力、安全性能仍需进一步评估, 确保实际应用的安全性。目前食品包装的一部分用于内包装, 例如方便面调料包的包装等。随着研究技术的不断发展, 对特定种类产品需要的包装, 与传统包装相比, 生物基活性食品包装性能更优异且更便捷的服务于人们的日常, 安全性能需有更高的保障。(3) 在研究新型生物基活性包装的同时, 应探讨其在实际食品包装上应用的可行性及应用范围, 深入研究其在日常条件下的适宜性能, 例如用于食品的内包装还是外包装, 是直接接触还是间接接触, 包装后的食品在低温下存放还是常温条件下存放等情况, 需探究选择包装的适宜性。(4) 生物基活性包装材料的规模化生产。当下生物基活性材料的研究大部分尚停留于实验室研发及试验阶段, 还未进行大规模的工业化生产。后续需通过对基材的改性、工艺参数的优化、工艺技术路线的改进等方式逐步开始实现规模化、标准化生产。

综上, 在选择生物基活性包装时, 首先需考虑被包装食品的类型, 例如用于肉制品的包装需高阻隔性, 以隔绝周围环境的氧气, 降低脂肪的氧化及蛋白质的变性程度; 用于果蔬类的食品包装, 需根据果蔬的呼吸强度进行选取, 比如新鲜果蔬采后需进行呼吸作用等。同时, 还需注意食品贮藏及流通过程中的环境温度等条件。总之, 食品种类繁多, 需根据食品特点和包装的目的选取有效的生物基活性包装材料。此外, 消费者对于生物基活性包装的认知程度较低, 未来如何更好地开发安全性高、具有良好的机械性能、功能特性的新型生物基活性包装, 取得消费者的认可极为重要, 同时降低生产成本也是生物基活性包装材料大批量应用亟待解决的关键问题之一。

参考文献

- [1] ZOU Y, ZHANG CP, WANG Y, *et al.* Electrospun chitosan/polycaprolactone nanofibers containing chlorogenic acid-loaded halloysite

- nanotube for active food packaging [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 247: 116711.
- [2] SEGUENI N, BOUTAGHANE N, ASMA ST, *et al.* Review on propolis applications in food preservation and active packaging [J]. *Plants Basel*, 2023, 12(8): 1654
- [3] ASGHER M, QAMAR SA, BIAL M, *et al.* Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials [J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109625.
- [4] MENDES AC, PEDERSEN GA. Perspectives on sustainable food packaging: Is bio-based plastics a solution? [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 112: 839–846.
- [5] RHIM JW, PARK HM, HA CS. Bio-nanocomposites for food packaging applications [J]. *Prog Polym Sci*, 2013, 38: 1629–1652.
- [6] ROY S, RHIM J. Carboxymethyl cellulose-based antioxidant and antimicrobial active packaging film incorporated with curcumin and zinc oxide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 148: 666–676.
- [7] YILDIRIM S, ROCKER B, PETERSEN MK, *et al.* Active packaging applications for food [J]. *Compr Rev Food Sci F*, 2018, 17: 165–199.
- [8] WANGPRASERTKUL J, SIRIWATTANAPONG R, HARNKARNSUJARIT N. Antifungal packaging of sorbate and benzoate incorporated biodegradable films for fresh noodles [J]. *Food Control*, 2021, 123: 107763.
- [9] CHENG J, WANG H, XIAO F, *et al.* Functional effectiveness of double essential oils@yam starch/microcrystalline cellulose as active antibacterial packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 186: 873–885.
- [10] LABUZA TP, HYMAN CR. Moisture migration and control in multi-domain foods [J]. *Trends Food Sci Technol*, 1998, 9: 47–55.
- [11] SHAO HJ, JIANG YZ, PAN FY, *et al.* Chemical composition, UV/vis absorptivity, and antioxidant activity of essential oils from bark and leaf of *phoebe zhennan* S. K. Lee & F. N. Wei [J]. *Nat Prod Res*, 2020, 34(6): 876–879.
- [12] MU HL, GAO HY, CHEN HJ, *et al.* A nanosized oxygen scavenger: Preparation and antioxidant application to roasted sunflower seeds and walnut [J]. *Food Chem*, 2013, 136(1): 245–250.
- [13] 刘金铭, 孔保华, 王辉. 抗氧化活性包装阻氧性与活性剂应用研究进展[J]. *包装工程*, 2021, 42(5): 111–118.
- LIU JM, KONG BH, WANG H. Oxygen resistance of antioxidant active packaging and application of antioxidant active agent [J]. *Packag Eng*, 2021, 42(5): 111–118.
- [14] 闵甜甜. 多功能抗菌活性包装材料的设计及其在果蔬保鲜中的应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- MIN TT. Design of multifunctional antimicrobial active packaging materials and their applications in fruit and vegetable preservation [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [15] 王梦军, 年琳玉, 曹崇江. 功能性食品包装材料的研究进展及发展趋势[J]. *包装工程*, 2020, 41(7): 65–76.
- WANG MJ, NIAN LY, CAO CJ. Research progress and development trend of functional food packaging materials [J]. *Packag Eng*, 2020, 41(7): 65–76.
- [16] LÓPEZ OV, VILLANUEVA ME, COPELLO GJ, *et al.* Flexible

- thermoplastic starch films functionalized with copper particles for packaging of food products [J]. *Funct Compos Mater*, 2020, 1(1): 1–10.
- [17] 贾兆阳. 具有阻隔紫外线功能透明塑料材料在食品包装上的应用研究[J]. 包装工程, 2006, (6): 31–39.
- JIA ZY. Application of transparent UV obstructing plastic in food-packaging [J]. *Packag Eng*, 2006, (6): 31–39.
- [18] CALVO ME, SMIRNOV JRC, MÍGUEZ H. Novel approaches to flexible visible transparent hybrid films for ultraviolet protection [J]. *J Polym Sci Pol Phys*, 2012, 50(14): 945–956.
- [19] LIZUNDIA E, ARMENTANO I, LUZI F, *et al*. Synergic effect of nano lignin and metal oxide nanoparticles into poly(l-lactide) bionanocomposites: Material properties, antioxidant activity and antibacterial performance [J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2020, 3(8): 5263–5274.
- [20] 杜晶晶, 赵军伟, 程晓民, 等. 高效光催化降解气相苯纳米 TiO₂ 微球的制备[J]. 材料工程, 2020, 48(5): 100–105.
- DU JJ, ZHAO JW, CHENG XM, *et al*. Preparation of nano-TiO₂: Microspheres with high efficiency in photocatalytic degradation of gaseous benzene [J]. *J Mater Eng*, 2020, 48(5): 100–105.
- [21] MA Y, DAI J, WU L, *et al*. Enhanced anti-ultraviolet, anti-fouling and anti-bacterial polyelectrolyte membrane of polystyrene grafted with trimethyl quaternary ammonium salt-modified lignin [J]. *Polymer*, 2017, 114: 113–121.
- [22] MORTEZA SG, SANAZ A, HAN W, *et al*. Impact of nanostructured thin ZnO film in ultraviolet protection [J]. *Int J Nanomed*, 2017, 12: 207–216.
- [23] XIONG F, WU Y, LI G, *et al*. Transparent nanocomposite films of lignin nanospheres and poly(vinyl alcohol) for UV-absorbing [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2018, 25(2): 6585–6593.
- [24] MASTROMATTEO M, DANZA A, CONTE A, *et al*. Shelf life of ready to use peeled shrimps as affected by thymol essential oil and modified atmosphere packaging [J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 144: 250–256.
- [25] 赵巍. 山葡萄籽油的提取及微胶囊化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- ZHAO W. A study on the extraction and microcapsule of the amur grape seed oil [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.
- [26] 刘荣, 王慧. 不同油脂及抗氧化剂对韧性饼干氧化变质的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 96–104.
- LIU R, WANG H. Effects of different oils and antioxidants on oxidative deterioration of toughened biscuits [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(8): 96–104.
- [27] WANG B, SUI J, YU B, *et al*. Physicochemical properties and antibacterial activity of corn starch-based films incorporated with *Zanthoxylum bungeanum* essential oil [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 254: 117314.
- [28] OJOGBO E, JARDIN J, MEKONNEN TH. Robust and sustainable starch ester nanocomposite films for packaging applications [J]. *Ind Crop Prod*, 2020, 160(1): 113153.
- [29] 徐梓轩, 丁姣, 周向阳, 等. 柠檬酸改性淀粉/PVA 薄膜的制备及其对芒果保鲜的研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2019, 32: 17–22.
- XU ZX, DING J, ZHOU XY, *et al*. Preparation of citric acid modified starch/PVA film and its application in preservation of mango [J]. *J Zhongkai Univ Agric Eng*, 2019, 32: 17–22.
- [30] FOMSECA LM, RADUNZ M, DOS-SANTOS HC, *et al*. Electrospun potato starch nanofibers for thyme essential oil encapsulation: Antioxidant activity and thermal resistance [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100: 4263–4271.
- [31] 刘星凯, 任菲, 王书军. 淀粉基抗菌食品包装膜的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 1–9.
- LIU XK, REN F, WANG SJ. Advances in starch-based antibacterial food packaging films [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(1): 1–9.
- [32] 戴卿印, 周鑫, 黄茜, 等. 大豆分离蛋白-壳聚糖可食用性抗菌膜的制备与性能评价[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(6): 89–95.
- DAI QY, ZHOU X, HUANG X, *et al*. Preparation and performance evaluation of soybean protein isolate-chitosan edible antibacterial film [J]. *Grain Oil*, 2022, 35(6): 89–95.
- [33] NIASA IU, ASHWAS BA, SHAN A, *et al*. Development of potato starch-based active packaging films loaded with antioxidants and its effect on shelf life of beef [J]. *J Food Sci Technol-Mys*, 2015, 52: 7245–7253.
- [34] SONG KB, KANG JH. Characterization of Job's tears (*Coixlachryma-jobi* L.) starch films incorporated with clove bud essential oil and their antioxidant effects on pork belly during storage [J]. *LWT*, 2019, 111: 711–788.
- [35] DÉSIÉ AY, CHARLEMAGNE N, CLAVER KD, *et al*. Starch-based edible films of improved cassava varieties Yavo and TMS reinforced with microcrystalline cellulose [J]. *Heliyon*, 2021, 7(4): e06804.
- [36] WU JG, WANG PJ, CHEN SC. Antioxidant and antimicrobial effectiveness of catechin-impregnated PVA-starch film on red meat [J]. *J Food Qual*, 2010, 33(6): 780–801.
- [37] CAZON P, VAZQUEZ M, VELAZQUEZ G. Regenerated cellulose films with chitosan and polyvinyl alcohol: Effect of the moisture content on the barrier, mechanical and optical properties [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 236: 116031.
- [38] KUMAR S, NEHRA M, DILBAGHI N, *et al*. Recent advances and remaining challenges for polymeric nanocomposites in healthcare applications [J]. *Prog Polym Sci*, 2018, 80: 1–38.
- [39] 陈倩茜, 常春雨. 纤维素纳米纤维在食品包装领域的研究进展[J]. 包装工程, 2022, 43(23): 1–8.
- CHEN QX, CHANG CY. Research progress of cellulose nanofibers in food packaging [J]. *Packag Eng*, 2022, 43(23): 1–8.
- [40] 罗嘉倩, 苏艳群, 刘金刚, 等. 纳米纤维素材料氧气与水蒸气阻隔性能的研究现状[J]. 中国造纸学报, 2019, 34: 61–70.
- LUO JQ, SU YQ, LIU JG, *et al*. Research status of the oxygen and water vapor barrier properties of nano-cellulose materials [J]. *Trans China Pulp Paper*, 2019, 34(3): 61–70.
- [41] WANG W, YU Z, ALSAMMARRIE FK, *et al*. Properties and antimicrobial activity of polyvinyl alcohol-modified bacterial nanocellulose packaging films incorporated with silver nanoparticles [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 100: 105411.
- [42] YU Z, WANG W, KONG F, *et al*. Cellulose nanofibril/silver nanoparticle

- composite as an active food packaging system and its toxicity to human colon cells [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 129: 887–894.
- [43] SONI B, MAHMOUD B, CHANG S, *et al.* Physicochemical, antimicrobial and antioxidant properties of chitosan/TEMPO biocomposite packaging films [J]. *Food Packag Shelf*, 2018, 17: 73–79.
- [44] MISSO AL, MATTOS, FERREIRA, *et al.* Nanocellulose-tannin films: From trees to sustainable active packaging [J]. *J Clean Prod*, 2018, 184: 143–151.
- [45] 谭瑞心, 张万刚, 周光宏. 牛至精油-羧甲基纤维素活性包装膜制备及其抗氧化和抗菌性能研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40: 90–96.
- TAN RX, ZHANG WG, ZHOU GH. The preparation of oregano essential oil-carboxymethyl cellulose active packaging film and its antioxidant and antibacterial properties [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(12): 90–96.
- [46] OUN AA, RHIM JW. Characterization of carboxymethyl cellulose-based nanocomposite films reinforced with oxidized nanocellulose isolated using ammonium persulfate method [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 174: 484–492.
- [47] AADIL KR, PRAJAPATI D, JHA H. Improvement of physio-chemical and functional properties of alginate film by *Acacia* lignin [J]. *Food Packag Shelf*, 2016, 10: 25–33.
- [48] CROUVSIER UK, LAGORCE-TACHON A, LAUQUIN C, *et al.* Impact of the homogenization process on the structure and antioxidant properties of chitosan-lignin composite films [J]. *Food Chem*, 2017, 236: 120–126.
- [49] SHEN C, YANG Z, WU D, *et al.* The preparation, resources, applications, and future trends of nanofibers in active food packaging: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023. DOI: 10.1080/10408398.2023.2214819
- [50] LIU F, QIN B, HE L, *et al.* Novel starch/chitosan blending membrane: Antibacterial, permeable and mechanical properties [J]. *Carbohydr Polym*, 2009, 78(1): 146–150.
- [51] WANG P, WANG H, LIU J, *et al.* Montmorillonite@chitosan-poly(ethylene oxide) nanofibrous membrane enhancing poly(vinyl alcohol-co-ethylene) composite film [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 181: 885–892.
- [52] 马捷. 壳聚糖涂膜对鲜切哈密瓜品质、抗氧化能力和微生物污染的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- MA J. Effect of chitosan coating on quality, antioxidant capacity and microbial contamination of fresh-cut Hami melons [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [53] 何栋, 程博, 唐婷. ZnO/壳聚糖/淀粉膜的制备及性能研究[J]. *数字印刷*, 2022, (2): 95–101.
- HE D, CHENG B, TANG T. Preparation and properties of ZnO/chitosan/starch films [J]. *Digit Print*, 2022, (2): 95–101.
- [54] 王梦年, 年琳玉, 曹崇江. 功能性食品包装材料的研究进展及发展趋势[J]. *包装工程*, 2020, 41(7): 65–76.
- WANG MJ, NIAN LY, CAO CJ. Research progress and development trend of functional food packaging materials [J]. *Packag Eng*, 2020, 41(7): 65–76.
- [55] RAMBABU K, BHARATH G, BANAT F, *et al.* Mango leaf extract incorporated chitosan antioxidant film for active food packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 126: 1234–1243.
- [56] 闫安, 张秀玲, 杜妹玲, 等. 薇菜天然复配保鲜剂配方的优化及其对薇菜贮藏期生理指标的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40: 280–285.
- YAN AN, ZHANG XL, DU ML, *et al.* Optimization of the formula of natural compound antistaling agent of *Osmunda odoratum* and its effect on physiological indicators of *Osmunda odoratum* during storage [J]. *Technol Food Ind*, 2019, 40(4): 280–285.
- [57] LAN W, HE L, LIU Y. Preparation and properties of sodium carboxymethyl cellulose/sodium alginate/chitosan composite film [J]. *Coatings*, 2018, 8: 291.
- [58] 张园园, 卢奕彤, 张焕杰, 等. 茶多酚、壳聚糖、乳清蛋白复配保鲜剂对干豆腐保鲜效果的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(3): 328–334.
- ZHANG YY, LU YT, ZHANG HJ, *et al.* Effects of tea polyphenol, chitosan and whey protein compound preservatives on the preservation effects of dried Tofu [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(3): 328–334.
- [59] YONG H, LIU J, QIN Y, *et al.* Antioxidant and pH-sensitive films developed by incorporating purple and black rice extracts into chitosan matrix [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 137: 307–316.
- [60] 王倩, 纠敏, 孟媛媛, 等. 冬凌草甲素/壳聚糖复合膜对冰鲜鸡胸肉的保鲜效果[J]. *食品与机械*, 2021, 37: 125–130.
- WANG Q, JIU M, MENG YY, *et al.* The fresh-keeping effect of oridonin/chitosan composite film on chilled chicken breast [J]. *Food Mach*, 2021, 37(3): 125–130.
- [61] MINA K, MAHYAR M, ABBASALI Z, *et al.* A review on the use of chitosan and chitosan derivatives as the bio-adsorbents for the water treatment: Removal of nitrogen-containing pollutants [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 273: 118625.
- [62] TANG W, WANG J, HOU H, *et al.* Review: Application of chitosan and its derivatives in medical materials [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 240: 124398.
- [63] SHEN C, WU M, SUN C, *et al.* Chitosan/PCL nanofibrous films developed by SBS to encapsulate thymol/HP β CD inclusion complexes for fruit packaging [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 286: 119267.
- [64] RINAUDO M. Chitin and chitosan: Properties and applications [J]. *Prog Poly Sci*, 2006, 31(7): 603–632.
- [65] DUAN M, SUN J, YU S, *et al.* Insights into electrospun pullulan-carboxymethyl chitosan/PEO core-shell nanofibers loaded with nanogels for food antibacterial packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 233: 123433.
- [66] SHEN C, YANG Z, RAO J, *et al.* Development of a thermally conductive and antimicrobial nanofibrous mat for the cold chain packaging of fruits and vegetables [J]. *Mater Design*, 2022, 221: 110931.
- [67] HU X, LIU Y, ZHU D, *et al.* Preparation and characterization of edible carboxymethyl cellulose films containing natural antibacterial agents: Lysozyme [J]. *Food Chem*, 2022, 385: 132708.
- [68] DEMIRCAN B, OZDESTAN OO. The effects of ethyl lauroyl arginate and lemon essential oil added edible chitosan film coating on biogenic amines formation during storage in mackerel fillets [J]. *J Food Process Pres*, 2021, 45: 5e15454.

- [69] 王晨, 秦烨, 王志平. 大豆分离蛋白膜改性研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(3): 244–248.
- WANG C, QIN Y, WANG ZP. Research advances in modification of soy protein isolate film [J]. Food Ind, 2019, 40(3): 244–248.
- [70] XU F, DONG Y, ZHANG W, *et al.* Preparation of cross-linked soy protein isolate-based environmentally-friendly films enhanced by PTGE and PAM [J]. Ind Crop Prod, 2015, 67: 373–380.
- [71] 崔月婷, 郑环宇, 高春蕾, 等. 大豆分离蛋白膜阻湿性优化及其在微波食品中的应用[J]. 中国粮油学报, 2018, 33: 48–54.
- CUI YT, ZHENG HY, GAO CL, *et al.* Optimization of moisture barrier properties of soybean protein isolate film and its application in microwave food [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2018, 33(9): 48–54.
- [72] WANG H, WANG L. Developing a bio-based packaging film from soya by-products incorporated with valonea tannin [J]. J Clean Prod, 2017, 143: 624–633.
- [73] AMJADI S, GHOLZADEH S, EBRAHIMI A, *et al.* Development and characterization of the carvone-loaded zein/pullulan hybrid electrospun nanofibers for food and medical applications [J]. Ind Crops Prod, 2022, 183: 114964.
- [74] SHEN C, CAO Y, RAO J, *et al.* Application of solution blow spinning to rapidly fabricate natamycin-loaded gelatin/zein/polyurethane antimicrobial nanofibers for food packaging [J]. Food Packag Shelf, 2021, 29: 100721.
- [75] YAO ZC, CHANG MW, AHMAD Z, *et al.* Encapsulation of rose hip seed oil into fibrous zein films for ambient and on demand food preservation via coaxial electrospinning [J]. J Food Eng, 2016, 191: 115–123.
- [76] NIU B, ZHAN L, SHAO P, *et al.* Electrospinning of zein-ethyl cellulose hybrid nanofibers with improved water resistance for food preservation [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 142: 592–599.
- [77] 王海粟, 赵婷, 于佳弘, 等. 玉米醇溶蛋白膜的制备及其对黄金梨保鲜效果的研究[J]. 粮油食品科技, 2011, 19: 43–46.
- WANG HL, ZHAO T, YU JH, *et al.* Preparation of zein film and study of the effect on hwangkumbae preservation [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2011, 19: 43–46.
- [78] COLUSSI R, FERRIRA WM, BIDUSKI B, *et al.* Postharvest quality and antioxidant activity extension of strawberry fruit using allyl isothiocyanate encapsulated by electropunk zein ultrafine fibers [J]. LWT, 2021, 143: 111087.
- [79] 郑顺姬, 曹向禹, 隋智慧. 角蛋白膜的制备及应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(4): 251–256.
- ZHENG SJ, CAO XY, SUI ZH. Keratin film preparation and application research progress [J]. New Chem Mater, 2021, 49(4): 251–256.
- [80] 曲文娟, 宋雅婷, 张欣欣, 等. 胶原蛋白-壳聚糖膜的制备及其对猪肉的保鲜作用[J]. 现代食品科技, 2020, 36: 89–98.
- QU WJ, SONG YT, ZHANG XX, *et al.* Preparation of collagen-chitosan film and its fresh-keeping effect on pork [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36: 89–98.
- [81] 陈珊珊, 陶宏江, 王亚静, 等. 葵花籽壳纳米纤维素/壳聚糖/大豆分离蛋白可食膜制备工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 306–314.
- CHEN SS, TAO HJ, WANG YJ, *et al.* Process optimization of soy protein isolate-based edible films containing nanocrystalline cellulose from sunflower seed hull and chitosan [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2016, 32(8): 306–314.
- [82] 夏亚栋. 绿色包装材料 PLA(聚乳酸)[J]. 上海包装, 2016, (2): 39–41.
- XIA YD. Green packaging material PLA [J]. Shanghai Packag, 2016, (2): 39–41.
- [83] 张帆. 静电纺丝制备改性纳米纤维素增强聚乳酸复合薄膜的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- ZHANG F. Preparation of modified nanocellulose-reinforced polylactic acid composite film by electrospinning [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [84] 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 W, SUN ZH, LIU J, *et al.* Research progress of biodegradable food packaging materials [J]. Food Ind, 2018, 39(1): 216–218.
- [85] YE J, WANG S, LAN W, *et al.* Preparation and properties of polylactic acid-tea polyphenol-chitosan composite membranes [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 117: 632–639.
- [86] 戴璐, 张子怡, 薛雯, 等. 聚乳酸/牛至精油抗氧化活性包装膜的制备及性能研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60: 110–112, 126.
- DAI L, ZHANG ZY, XUE W, *et al.* Preparation and performance of polylactic acid/oregano essential oil antioxidant active packaging film [J]. Hubei Agric Sci, 2021, 60: 110–112, 126.
- [87] TURALIJA M, BISCHOF S, BUDIMIR A, *et al.* Antimicrobial PLA films from environment friendly additives [J]. Compos Part B Eng, 2016, 102: 94–99.
- [88] YALCINKAYA EE, PUGLIA D, FORTUNATI E, *et al.* Cellulose nanocrystals as templates for cetyltrimethylammonium bromide mediated synthesis of Ag nanoparticles and their novel use in PLA films [J]. Carbohydr Polym, 2017, 157: 1557–1567.
- [89] 王向宇. 生物降解聚乳酸共混薄膜的结构和性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- WANG XY. Study on the structure and properties of biodegradable poly (lactic acid) blend film [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



安艳霞, 博士, 副教授, 主要研究方向为谷物化学、农产品加工副产物的综合利用。
E-mail: yanxiaan@henau.edu.cn