

# 生物基可降解聚合物食品包装材料发展及应用综述

刘佳欣, 赵晓颖, 翁云宣

(北京工商大学 化学与材料工程学院, 北京 100048)

**摘要:** **目的** 介绍生物基聚合物包装的研究进展, 总结生物基聚合物包装材料的功能化。**方法** 综述目前生物基聚合物包装材料来源的分类, 列举天然生物基聚合物、微生物合成的生物基聚合物和化学合成的生物基聚合物在食品包装方面的研究进展, 总结生物基聚合物包装材料的功能化方向(抗菌、抗氧化、pH响应、光热响应等)。**结论** 生物基聚合物食品包装在绿色食品包装领域有较好的应用潜力。

**关键词:** 生物基聚合物; 绿色食品包装; 功能食品包装

**中图分类号:** TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)13-0019-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.003

## Development and Application of Biobased Materials for Food Packaging

LIU Jia-xin, ZHAO Xiao-ying, WENG Yun-xuan

(College of Chemistry and Materials Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**ABSTRACT:** The work aims to introduce the research progress of biobased polymer packaging and provide a reference for further research on the functionalization of biobased polymer packaging materials. According to the source classification of biobased polymer packaging materials, the research progress of natural biobased polymers, microbially synthesized biobased polymers and chemically synthesized biobased polymers was summarized and the functionalization of these biobased polymers and their applications for food packaging, such as antibacterial, antioxidant, pH-responsive, photo-thermal responsive packaging applications was concluded. The food packaging from biobased polymer has a great application potential in the green food packaging field.

**KEY WORDS:** biobased polymers; green food packaging; functional food packaging

食品包装是食品生产的关键过程之一, 在生产、储存和销售等环节影响着食品安全。目前, 90%以上的塑料包装原料为石油基, 不可再生且难以生物降解<sup>[1]</sup>。近些年来, 以生物基聚合物为原料的环境友好型包装材料吸引了越来越多人的兴趣。这类包装的应用能够有效解决石油基塑料包装造成的环境问题, 满足消费者日益增加的环保需求。本文将总结近年来不同种类的生物基聚合物包装材料的研究进展, 展望其未来的

发展方向。

## 1 生物基聚合物及其食品包装应用

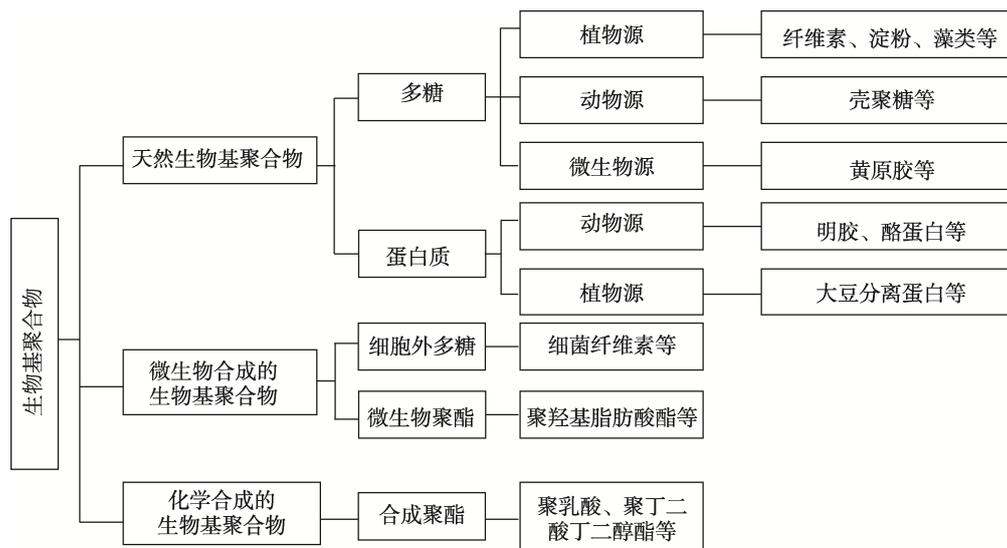
生物基聚合物根据其原料来源可分为天然生物基聚合物、微生物合成的生物基聚合物和化学合成的生物基聚合物(图1)<sup>[2]</sup>。以下部分将介绍生物基聚合物的特点及其在食品包装中的应用。

收稿日期: 2023-03-12

基金项目: 北京工商大学高层次人才队伍建设专项项目(19008022215); 国家自然科学基金青年科学基金项目(22208006); 北京市科委项目(Z211100004321004)

作者简介: 刘佳欣(1998—), 女, 硕士生, 主攻食品包装膜。

通信作者: 赵晓颖(1986—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为生物降解食品包装材料; 翁云宣(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生物基材料及环境友好高分子材料。



## 1.1 天然生物基聚合物

### 1.1.1 多糖

多糖来源广泛，具有良好的生物相容性、生物降解性、无毒性等优点，是良好的食品包装材料基质<sup>[3]</sup>。多糖的来源为植物源、动物源和微生物源等。

来自植物源中的纤维素是世界上产量最丰富的天然高分子化合物。由于纤维素自身含有很多羟基，其亲水性、水溶性和成膜性较差，结晶度较高，这使得纸质包装材料具有较差的气体阻隔性和抗菌性，限制了其在食品包装中的应用范围<sup>[4]</sup>。所以当前该材料包装发展的方向是提高其阻隔性。研究发现，淀粉和纳米纤维素之间存在一定的协同作用，纳米纤维素可封闭纸张结构，可用于纸张的表面处理<sup>[5]</sup>。He等<sup>[6]</sup>利用羧甲基纤维素作为基体，纳米银及纳米纤维素（Cellulose Nanocrystals, CNC, 质量分数为7%）作为填料阻挡水蒸气分子，可以减缓水蒸气分子通过的速度，并提高基体的阻隔性。纳米银与CNC上的羟基通过离子-偶极相互作用以及络合作用，均匀分散在CNC表面。结果表明，该涂布纸包装可将草莓的保质期延长至7 d，而未包装的草莓仅在5 d就出现腐坏。

来自植物源的海藻酸钠，有着良好的生物相容性、生物降解性等特性，可用于可食性食品包装的制备<sup>[7]</sup>。但是海藻酸盐易在存放过程中受微生物的影响产生变质，常通过添加天然抗菌剂、精油等来达到抗菌、抗氧化的效果。Singh等<sup>[8]</sup>利用柠檬酸、酒石酸交联海藻酸钠/果胶，制得海藻酸钠可食性薄膜。经小鼠饲喂试验表明，该包装安全可食用。

来自动物源的壳聚糖是甲壳素经脱乙酰化产生的碱性衍生物，是天然多糖中唯一的碱性多糖，在食品保鲜绿色包装方面具有良好的应用前景<sup>[9]</sup>。壳聚糖

薄膜有着力学性能差、抗水性差等缺点，因此常通过碱处理中和壳聚糖中的质子胺，提高机械强度和实用性<sup>[10]</sup>。Song等<sup>[11]</sup>通过在预先构建的纤维素网络引入壳聚糖和交联剂，形成互穿网络，制备了纤维素/壳聚糖/柠檬酸薄膜。与纯纤维素薄膜相比，加入壳聚糖/柠檬酸后，纤维素网络与壳聚糖网络产生氢键和离子相互作用，使得该薄膜具有优异的耐水性、阻氧和抗菌能力。与传统聚乙烯包装相比，该包装对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌有明显的抑制作用，在肉制品保鲜包装方面有着应用潜力。

来自微生物源的黄原胶，成膜性较强，含有氨基和羟基，易分散在水中，在药物输送、组织工程和食品包装等方面有着较好的潜力<sup>[12]</sup>。黄原胶在不同条件下黏度都很稳定，温度或pH值对其黏度影响很小<sup>[13]</sup>。Fan等<sup>[14]</sup>开发了一种由果胶（6 g/L）、海藻酸钠（5 g/L）和黄原胶（4 g/L）组成的新型可食用复合膜。通过响应面法优化后，薄膜的拉伸强度最大可达29.65 MPa，断裂伸长率达19.02%。将该材料以薄膜/浸泡的形式用于土豆（鲜切）的保鲜，浸泡土豆可保持8 d不长霉，显示出了该材料作为可食性包装较好的保鲜效果。

### 1.1.2 蛋白质

蛋白质由于其复杂的结构和组成，而具有许多功能特性。蛋白质在成膜时可以与邻近的分子相互作用，形成一层坚固的、内聚的、黏弹性的薄膜。蛋白质按照其来源可以分为动物源（明胶、酪蛋白等）和植物源（大豆蛋白、豆类种子蛋白等）<sup>[15]</sup>。

来自动物源的明胶（Gelatin）是动物缔结组织中胶原蛋白的部分降解产物，具有冷定型和热可逆的特点，随着温度的提高可以从凝胶转变为溶液的形式<sup>[16]</sup>。明胶结构中含有的羟基，在明胶接触高湿度的食品时，会

发生溶解、膨胀或解体, 所以需改善其阻水性。Pereira 等<sup>[17]</sup>使用纳米 ZnO 和甘油分别作为增强剂和增塑剂加入明胶中, 使得该膜在不同的相对湿度环境中 (11%、90%) 仍保持着稳定性。纳米 ZnO (质量分数为 4%) 有助于提高明胶的疏水性, 与明胶形成共价和非共价相互作用, 使得薄膜接触角增加了 7.5%。该膜可作为湿度指示剂应用于脱水食品中。

来自植物源的大豆分离蛋白 (Soybean Protein Isolate, SPI) 含有丰富的氨基酸, 是一种可再生、易降解、生物相容性好的蛋白质<sup>[18]</sup>。SPI 结构中含有氨基酸, 易因吸湿而发生变化, 常通过添加纳米颗粒、植物提取物、抗氧化剂和抗菌剂等方式提高性能。Rashidi 等<sup>[19]</sup>将乙基纤维素 (Ethyl Cellulose, EC)、苦橙皮提取物 (Bitter Orange Peel Extract, BOPE) 与 SPI 通过静电纺丝复合, 制备了具有抗菌性和抗氧化性的活性食品包装。当 EC/SPI 质量比为 1:1 时, 薄膜具有较好的热稳定性、氧阻隔性和力学性能。添加 BOPE (质量分数为 20%) 使薄膜具有抑制大肠杆菌和李斯特菌的能力, 抗菌能力比未添加 BOPE 的 EC/SPI 薄膜提高了 67.5%。

## 1.2 微生物合成的生物基聚合物

细菌纤维素 (Bacterial Cellulose, BC) 为多孔性网状生物高分子聚合物, 由直径为 20~100 nm 的纳米纤维组成, 具有较低的热膨胀系数、较高的结晶度和较好的韧性。与植物纤维素不同, BC 的合成过程是低能耗的绿色过程 (微生物发酵形成)<sup>[20]</sup>。当前 BC 的大部分研究集中于生物医学方面, 在食品包装领域的应用还有待发展。Zhou 等<sup>[21]</sup>将可得然胶 (质量分数为 4%)、肉桂精油 (质量分数为 10%) 与 BC (质量分数为 2%) 溶液混合制得包装膜, 可得然胶和 BC 之间形成了氢键相互作用, 提高了 BC 复合膜的致密性、结晶度、力学性能和热稳定性。添加肉桂精油提高了复合膜的抗氧化能力, 减少了 BC 的聚集。该复合膜可在 9 d 内有效抑制了大肠杆菌的生长, 并延缓鸡肉脂质的氧化。

聚羟基脂肪酸酯 (Polyhydroxyalkanoates, PHA) 是一种细胞利用其自身过剩碳源合成的天然聚酯材料。PHA 在自然条件下可以被微生物所分泌的外解聚酶降解, 这些解聚酶覆盖在 PHA 材料表面诱发侵蚀, 最终导致 PHA 被分解为二氧化碳、水 (有氧条件下) 和甲烷 (无氧条件下)<sup>[22]</sup>。PHA 因为脆性较高和热稳定性较差而限制了其的一些应用。PHA 常通过添加精油、增塑剂、无机填料等改善其力学性能。Zheng 等<sup>[23]</sup>采用 PHA (质量分数为 18.4%)、聚乳酸 (质量分数为 73.6%)、蒙脱土 (质量分数为 4%) 和牛至精油 (质量分数为 4%) 制备活性包装。其中蒙脱土制造了层间空隙, 使得牛至精油可以从 PHA 基质中缓慢释放, 从而延长包装材料保鲜作用时间。该

包装材料对河豚鱼片有着良好的保鲜性能, 可在 4℃ 下提高河豚肉质新鲜度 40%~60%, 可以有效延长海鲜类食品的货架期。

## 1.3 化学合成的生物基聚合物

聚乳酸 (Polylactic Acid, PLA) 是以乳酸为主要原料聚合得到的, 原料来源充分且可再生。使用 PLA 材料比使用传统石油基聚合物更有助于减少不可再生能源的消耗<sup>[24]</sup>。PLA 有着较好的生物相容性、较好的力学性能以及良好的生物降解性 (特定条件下), 已被广泛应用于医疗、包装容器和环境修复膜等领域, 是当前最有发展前途的绿色包装材料。Chaiya 等<sup>[25]</sup>将质量比 3:1 的聚乳酸与聚环氧乙烷熔融共混, 利用 PEO 提高了 PLA 的延展性、热性能和力学性能。通过 3D 打印技术, 打印 PLA/PEO 基底, 又通过喷墨打印技术将氯化钴湿度指示剂喷涂在 PLA/PEO 骨架表面, 制备了湿敏型三维包装材料。当湿度增加时, 该材料颜色从蓝色变化为粉色, 使其有望应用于监测环境湿度的包装。

聚丁二酸丁二醇酯 (Poly(butylene succinate), PBS) 的原料不仅可以来源于石油基, 也可以来源于生物基, 如可以通过葡萄糖、乳糖、纤维素等发酵制备。PBS 可生物降解, 可被动物体内的酶和自然界中多种微生物分解, 在有氧条件下分解为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O, 厌氧条件下分解为 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub><sup>[26]</sup>。PBS 作为包装除了需要一定的机械强度外, 还需要具有一定的抗菌功能。Lpusiewicz 等<sup>[27]</sup>将槲皮素 (Quercetin) (质量分数为 0.5%) 添加到 PBS 中, 制备了具有抗菌和抗氧化作用的食物包装薄膜材料。槲皮素具有很强的抗氧化、抗炎、抗癌和抗病毒等特性, 常被用作化妆品和食品添加剂。添加槲皮素虽提高了 PBS 的抗菌性能, 但降低了其力学性能, 使得 PBS 拉伸强度由 11.8 MPa 下降至 8.4 MPa。随着槲皮素添加量的增加, 薄膜颜色由白色变为黄色, 该颜色变化可以减缓由光诱导的氧化。将该 PBS 包装应用于食品中时, 可避免营养物质的损失、变色和异味。PBS 系列生物降解材料产品的价格较高, 当前限制发展的主要问题是性价比问题。近年来, PBS 在包装袋、卫生防护用品、纺织服饰等领域的应用逐渐起步, 将进一步降低成本, 推动生物基聚合物的产业发展。

## 2 生物基包装材料的功能化

食品在贮藏过程中, 质量会不断变化, 其内部主要是 pH 值和微生物的变化, 外部主要为贮藏条件的变化<sup>[28]</sup> (见图 2)。包装的功能化可以使食品包装在保持食品新鲜度的同时, 又能起到功能性抗菌或抗氧化等作用, 改变微环境, 延长保鲜时间和食用品质。

## 2.1 抗菌功能

食品包装通常采用加入抗菌剂的方式延长易腐食品的保质期,抗菌剂可有效减少食品中的微生物、保障食品品质、延长食品货架期。近年来,常通过加入天然抗菌剂制备活性食品包装,抗菌剂的主要来源可分为三大类:植物源、动物源和微生物源。

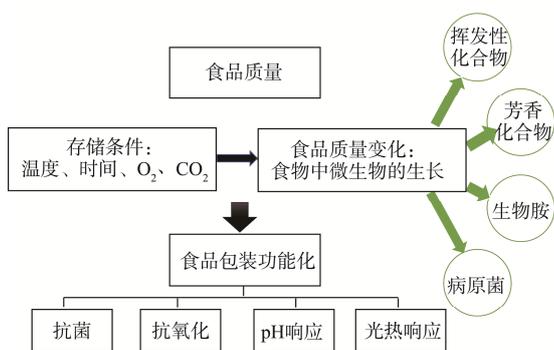


图2 食品包装功能化发展  
Fig.2 Development of food packaging functionalization

植物精油为具有芳香气味植物的次生代谢产物,其来源广泛、安全环保,并且抑菌抗菌效果较好。精油添加到包装中后,对多种微生物都具有一定的抑制作用,并能一定程度上改善材料的力学性能<sup>[29]</sup>。Song等<sup>[30]</sup>将质量比1:1的茶树精油加入壳聚糖溶液中制膜,茶树精油的加入提高了壳聚糖薄膜的抗菌性能,可以有效防止食源性细菌所造成的食品变质。

动物源抗菌剂中,蜂胶逐渐从药用走向抗菌包装领域,蜂胶中含有的酚类化合物具有抑菌效果。Olewnik-kruszkowska等<sup>[31]</sup>将蜂胶提取物(5 mL)加入PLA-PEG(50 mL)中,制备PLA/蜂胶薄膜。蜂胶的加入使得PLA薄膜由透明变为黄色雾状,并显著提高了其水蒸气阻隔性。使用该包装保存蓝莓14 d后,蓝莓的质量损失不到15%,说明该包装可以在较长时间内保持水果的水分,延长水果的保质期。

微生物源抗菌剂中的乳酸链球菌素,可以很好地抑制食源性致病菌。Yang等<sup>[32]</sup>将尼生素与纤维素结合,制备了纳米纤维素薄膜。将该薄膜用于火腿包装内衬,在4℃下,7 d内可以有效抑制李斯特菌的生长,该发现还有望扩大纳米纤维素在绿色食品包装中的应用。

## 2.2 抗氧化功能

天然抗氧化剂中的植物提取物具有抗氧化性,一般含有酚类物质、维生素C、类胡萝卜素等,可以有效地清除自由基,延长食品的保质期。Yong等<sup>[33]</sup>将甘薯提取物(Purple-Fleshed Sweet Potato Extract,

PSPE)加入壳聚糖溶液(质量分数为2%)中,制备了既有抗氧化性又有pH响应性的活性包装。PSPE中的花青素在酸性时呈现橘色,碱性时呈绿色。随着PSPE加入量的增加,薄膜的透明度下降,但抗氧化能力和pH响应能力都有提高。添加PSPE(质量分数为10%)的壳聚糖薄膜可以作为智能包装薄膜使用,可展示肉类新鲜度。

## 2.3 pH响应功能

食品在变质过程中会产生挥发性气体,如水果易产生酸性气体、肉类易产生碱性气体。随着食品的变质,气体逐渐累积在包装内部,会与水分结合导致pH值的变化。姜黄素水溶液在酸性时呈黄色,碱性时呈紫色,有着灵敏的pH值响应性。Ezati等<sup>[34]</sup>在果胶中加入姜黄素和硫纳米颗粒,制备了具有pH值响应和抗氧化功能的智能食品包装。该薄膜可通过pH值响应的颜色变化来展示虾的变质程度。在虾存放36 h后,薄膜颜色由原本的黄色变为红色,指示该虾为碱性,新鲜度有所下降。该包装在检测水产品、肉制品的活性以及智能包装应用方面具有很大潜力。

## 2.4 光热响应功能

温度是影响食品保质期的一个重要因素,不适当的储藏温度会使肉类或蛋白质变性,随着温度变化控制释抗菌剂可有效延长食品保鲜期<sup>[35]</sup>。Xing等<sup>[36]</sup>将聚吡咯引入海藻酸/明胶形成半互穿网络,利用聚吡咯的光热转换能力,以及明胶热致相变的特性,制备了温度响应型复合水凝胶。实验通过温度曲线评估该凝胶的光热转化能力,在阳光照射600 s后,材料温度上升了17℃。该结果证明聚吡咯有明显的光热效应,且该效应可被用于制备光热响应包装材料。

## 3 生物基聚合物的降解性及评价方法

随着全球范围内大量的塑料垃圾被排放到环境中,对生态系统造成了污染。相较于石油基塑料,可生物降解聚合物最重要的优势在于能被天然微生物分解,已被认为是解决污染的主要方案之一<sup>[37]</sup>。可生物降解聚合物在有氧条件下会降解产生二氧化碳、水、无机盐和其他新物质;在厌氧条件下会产生甲烷或低分子量酸<sup>[38]</sup>。生物基聚合物的降解通常用质量损失、相对分子质量变化和力学性能损失来衡量,但降解过程会受到结构、组成、化学键、应力和环境条件(pH值、温度、湿度)等因素的限制<sup>[39]</sup>。

生物可降解包装的模拟实验通常是参照国际(ISO)、欧洲(CEN)和美国(ASTM)等标准进行,通常在堆肥、土壤、污泥、淡水和海水等环境模拟材料的降解过程。堆肥法是目前国际上评价塑料生物降解性能的主要方法,能反映塑料在自然环境中的生物

降解能力(宏观层面)<sup>[40]</sup>。根据 EN 13432 等标准,可堆肥材料须满足:能够被自然存在的微生物分解,生物降解塑料与制品必须包含一半以上有机物,重金属含量不得超标;12 周内碎片化至肉眼不可分辨的大小(<2 mm);堆肥 6 个月内至少降解 90%;堆肥产物对植物生长发芽过程和蚯蚓等动物的生存无害<sup>[41]</sup>。工业化堆肥是在静态堆肥容器中,利用稳定的腐熟堆肥作为固床(养分和富含嗜热菌的接种物源),在恒温为(58±2)℃、一定氧浓度和湿度下,进行需氧堆肥(GB/T 19277.1—2011、GB/T 19277.2—2013)。家庭堆肥可自制设施,但很难维持堆肥中嗜热性细菌的增殖,产生土壤中温度分层<sup>[42]</sup>。因此新家庭堆肥规范中(GB/T 40553—2021)温度仅要求保持在(25±5)℃。使用家庭堆肥方法评估生物基聚合物材料的降解速度,具有经济有效、符合可持续发展的绿色观念等优点,但存在收益较低、产物质量不稳定和储存成本较高等缺点。

除堆肥外,也可在土壤中进行降解实验。土壤降解可发生在不同的地点和季节,无须工业堆肥较高的温度要求。在土壤降解环境下评估材料的降解速度,天然生物基聚合物材料的降解速度较快,如壳聚糖薄膜 25 d 可降解 70%以上<sup>[43]</sup>,但 PLA 等合成材料在土壤中降解较慢,只有高温堆肥条件下才易发生降解(200 d 降解 92%)<sup>[44]</sup>。土壤环境虽含有不同于堆肥环境的微生物,但它们同样可以将生物聚合物转化为二氧化碳、水和新的生物质<sup>[45]</sup>,符合可持续发展的绿色观念。

在海水中,生物降解材料的降解性能实验常用的标准为 ISO 18830、ISO 19679 等。材料在海洋环境和堆肥环境中降解存在着较大的差异。相较于堆肥环境,海洋环境温度较低(0~30℃),微生物种类较少。一些聚合物,如聚己二酸丁二酯和聚对苯二甲酸丁二酯,在土壤或堆肥环境中易降解,但在海水环境中不易降解,最终导致大量塑料垃圾堆积<sup>[46]</sup>。因此,研究生物基聚合物材料在海水中的降解性能对缓解污染问题具有指导意义。

淡水包括河流、泉水、湖泊和沼泽等环境。淡水环境的微生物群落与堆肥、海水、土壤等环境均不同,因此仍需探索淡水中不同类型材料的降解机制<sup>[47]</sup>。现有的大多数标准采用 CO<sub>2</sub>(有氧条件)和 CH<sub>4</sub>(厌氧条件)来确定材料的生物降解性,但聚合物在自然生态系统中降解所需的时间被低估,在实际环境中难以达到在实验室中较高的降解率<sup>[48]</sup>。

## 4 结语

随着包装的大量使用,废弃包装产生的环境问题引起了人们的关注。近年来,生物基聚合物在科研和工业应用中发展迅速,具有资源节约和环境保护的双

重优势<sup>[49]</sup>。虽然生物基聚合物材料的性能略逊于传统石油基材料的,但作为石油基塑料的生态友好替代品,生物基聚合物材料可以缓解环境污染和资源枯竭的问题<sup>[50]</sup>。生物基聚合物包装经过功能化改性后具有良好的抗菌、抗氧化等性能,能够有效减少食品腐败、延长食品货架期,符合当前消费者对食品质量安全的需求。

目前,扩大生物基聚合物制备的规模,进行成本和技术可行性评估、生命周期性评价和对降解周期的评估都有待研究。随着生物基食品包装材料的发展,使用普鲁兰多糖、土豆淀粉等材料制备包装的新兴方式已经出现,但是目前国内和国际上关于此类食品包装的标准还没有进行更新,并且现有的石油基食品包装材料相关标准也不适用<sup>[51]</sup>。

此外,生物基聚合物材料在食品包装方面的实际应用还取决于消费者的需求。普通消费者对价格较敏感,导致绿色环保商品始终难以破圈<sup>[52]</sup>。生物基聚合物包装材料的发展以及工业化,需要科研机构、政府、消费者等多方面共同努力,从技术创新、政策引导、消费者教育等多个方面共同推进相关法规和规则的制订。展望未来,生物基聚合物材料有望在部分食品包装领域逐步替代传统石油基包装材料。

## 参考文献:

- [1] SONG Ting-yu, QIAN Sheng, LAN Tian-tong, et al. Recent Advances in Bio-Based Smart Active Packaging Materials[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2228.
- [2] NILSEN-NYGAARD J, FERNÁNDEZ E N, RADUSIN T, et al. Current Status of Biobased and Biodegradable Food Packaging Materials: Impact on Food Quality and Effect of Innovative Processing Technologies[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(2): 1333-1380.
- [3] ZHANG Hao-dong, ERIC S L W, ZHOU Jing-ping. Recent Developments of Polysaccharide-Based Double-network Hydrogels[J]. *Journal of Polymer Science*, 2023, 61(1): 7.
- [4] KARTHIKA R, JAYANTHI B, ARUNA A, et al. Handbook of Nanocelluloses[M]. Springer International Publishing, 2020: 1-34.
- [5] LOURENÇO A F, GAMELAS J A F, SARMENTO P, et al. Cellulose Micro and Nanofibrils as Coating Agent for Improved Printability in Office Papers[J]. *Cellulose*, 2020, 27(10): 6001-6010.
- [6] HE Yun-qing, LI Hui, FEI Xiang, et al. Carboxymethyl Cellulose/Cellulose Nanocrystals Immobilized Silver

- Nanoparticles as an Effective Coating to Improve Barrier and Antibacterial Properties of Paper for Food Packaging Applications[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252: 117156.
- [7] GHEORGHITA (PUSCASELU) R, GUTT G, AMARIEI S. The Use of Edible Films Based on Sodium Alginate in Meat Product Packaging: An Eco-Friendly Alternative to Conventional Plastic Materials[J]. *Coatings*, 2020, 10(2): 166.
- [8] SINGH P, BAISTHAKUR P, OMPRAKASH Y S. Synthesis, Characterization and Application of Crosslinked Alginate as Green Packaging Material[J]. *Heliyon*, 2020, 6(1): 03026.
- [9] PRIYADARSHI R, RHIM J. Chitosan-Based Biodegradable Functional Films for Food Packaging Applications[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 62: 102346.
- [10] LEITE MILIÃO G, SOUZA SOARES LD, BALBINO D F, et al. pH Influence on the Mechanisms of Interaction Between Chitosan and Ovalbumin: a Multi-Spectroscopic Approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123: 107137.
- [11] SONG Zi-yue, MA Tian-cong, ZHI Xiu-juan, et al. Cellulosic Films Reinforced by Chitosan-Citric Complex for Meat Preservation: Influence of Nonenzymatic Browning[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118476.
- [12] ELELLA M H, GODA E S, GAB-ALLAH M A, et al. Xanthan Gum-Derived Materials for Applications in Environment and Eco-Friendly Materials: A Review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(1): 104702.
- [13] HAZIRAH M A S P, ISA M I N, SARBON N M. Effect of Xanthan Gum on the Physical and Mechanical Properties of Gelatin-Carboxymethyl Cellulose Film Blends[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2016, 9: 55-63.
- [14] FAN Yan-ling, YANG Jing, DUAN An-bang, et al. Pectin/Sodium Alginate/Xanthan Gum Edible Composite Films as the Fresh-Cut Package[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 181: 1003-1009.
- [15] CALVA-ESTRADA S J, JIMÉNEZ-FERNÁNDEZ M, LUGO-CERVANTES E. Protein-Based Films: Advances in the Development of Biomaterials Applicable to Food Packaging[J]. *Food Engineering Reviews*, 2019, 11(2): 78-92.
- [16] LIN Lin, REGENSTEIN J M, LV Shun, et al. An Overview of Gelatin Derived from Aquatic Animals: Properties and Modification[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 68: 102-112.
- [17] PEREIRA P F M, PICCIANI P H S, CALADO V M A, et al. Gelatin-Based Nanobiocomposite Films as Sensitive Layers for Monitoring Relative Humidity in Food Packaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(6): 1063-1073.
- [18] KOSHY R, MARY S, THOMAS S, et al. Environment Friendly Green Composites Based on Soy Protein Isolate-A Review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 50: 174-192.
- [19] RASHIDI M, SEYYEDI MANSOUR S, MOSTASHARI P, et al. Electrospun Nanofiber Based on Ethyl Cellulose/Soy Protein Isolated Integrated with Bitter Orange Peel Extract for Antimicrobial and Antioxidant Active Food Packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 1313-1323.
- [20] CAZÓN P, VÁZQUEZ M. Bacterial Cellulose as a Biodegradable Food Packaging Material: A Review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106530.
- [21] ZHOU Li-bang, FU Jiang-chao, BIAN Luyao, et al. Preparation of a Novel Curdlan/Bacterial Cellulose/Cinnamon Essential Oil Blending Film for Food Packaging Application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 212: 211-219.
- [22] VU D H, ÅKESSON D, TAHERZADEH M J, et al. Recycling Strategies for Polyhydroxyalkanoate-Based Waste Materials: An Overview[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122393.
- [23] ZHENG Hui, TANG Hai-bing, YANG Chun-xiang, et al. Evaluation of the Slow-Release Polylactic Acid/Polyhydroxyalkanoates Active Film Containing Oregano Essential Oil on the Quality and Flavor of Chilled Pufferfish (*Takifugu Obscurus*) Fillets[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132693.
- [24] 宋丹阳, 郑红娟, 李一龙. 聚乳酸基油水分离材料研究进展[J]. *中国塑料*, 2022, 36(9): 187-192.
- SONG Dan-yang, ZHENG Hong-juan, LI Yi-long. Research Progress in PLA-Based Oil-Water Separation Materials[J]. *China Plastics*, 2022, 36(9): 187-192.
- [25] CHAIYA N, DARANARONG D, WORAJITTIPHON P, et al. 3D-printed PLA/PEO Blend as Biodegradable Substrate Coating with  $\text{CoCl}_2$  for Colorimetric Humidity Detection[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 32:

- 100829.
- [26] RESHMY R, PAULOSE T, PHILIP E, et al. Updates on High Value Products from Cellulosic Biorefinery[J]. *Fuel*, 2022, 308: 122056.
- [27] ŁOPUSIEWICZ Ł, ZDANOWICZ M, MACIEJA S, et al. Development and Characterization of Bioactive Poly(Butylene-Succinate) Films Modified with Quercetin for Food Packaging Applications[J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1798.
- [28] GAO Shu-ting, TANG Guo-sheng, HUA Da-wei, et al. Stimuli-Responsive Bio-Based Polymeric Systems and Their Applications[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7(5): 709-729.
- [29] ZUBAIR M, SHAHZAD S, HUSSAIN A, et al. Current Trends in the Utilization of Essential Oils for Polysaccharide- and Protein-Derived Food Packaging Materials[J]. *Polymers*, 2022, 14(6): 1146.
- [30] SONG Xue-ying, WANG Lei, LIU Liu, et al. Impact of Tea Tree Essential Oil and Citric Acid/Choline Chloride on Physical, Structural and Antibacterial Properties of Chitosan-Based Films[J]. *Food Control*, 2022, 141: 109186.
- [31] OLEWNIK-KRUSZKOWSKA E, GIERSZEWSKA M, WRONA M, et al. Polylactide-Based Films with the Addition of Poly(Ethylene Glycol) and Extract of Propolis-Physico-Chemical and Storage Properties[J]. *Foods*, 2022, 11(10): 1488.
- [32] YANG Yang, LIU Han-dong, WU Min, et al. Bio-Based Antimicrobial Packaging from Sugarcane Bagasse Nanocellulose/Nisin Hybrid Films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 627-635.
- [33] YONG Hui-min, WANG Xing-chi, BAI Ru-yu, et al. Development of Antioxidant and Intelligent pH-Sensing Packaging Films by Incorporating Purple-Fleshed Sweet Potato Extract into Chitosan Matrix[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 216-224.
- [34] EZATI P, RHIM J. pH-Responsive Pectin-Based Multifunctional Films Incorporated with Curcumin and Sulfur Nanoparticles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 230: 115738.
- [35] MÜLLER P, SCHMID M. Intelligent Packaging in the Food Sector: A Brief Overview[J]. *Foods*, 2019, 8(1): 16.
- [36] XING Jian-yu, DANG Wen-wen, LI Jing-chang, et al. Photo/Thermal Response of Polypyrrole-Modified Calcium Alginate/Gelatin Microspheres Based on Helix-Coil Structural Transition and the Controlled Release of Agrochemicals[J]. *Colloids and Surfaces B, Biointerfaces*, 2021, 204: 111776.
- [37] ERDAL N B, HAKKARAINEN M. Degradation of Cellulose Derivatives in Laboratory, Man-Made, and Natural Environments[J]. *Biomacromolecules*, 2022, 23(7): 2713-2729.
- [38] AKHLAQ S, SINGH D, MITTAL N, et al. Polyhydroxybutyrate Biosynthesis from Different Waste Materials, Degradation, and Analytic Methods: a Short Review[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80: 5965-5997.
- [39] YOGALAKSHMI K N, SINGH S. Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety[M]. Singapore: Springer, 2020: 99-133.
- [40] LIU Chao, LUAN Peng-cheng, LI Qiang, et al. Biodegradable, Hygienic, and Compostable Tableware from Hybrid Sugarcane and Bamboo Fibers as Plastic Alternative[J]. *Matter*, 2020, 3(6): 2066-2079.
- [41] RUJNIC-SOKELE M, PILIPOVIĆ A. Challenges and Opportunities of Biodegradable Plastics: A Mini Review[J]. *Waste Management & Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 2017, 35(2): 132-140.
- [42] BARRENA R, SÁNCHEZ A. Home Composting: A Review of Scientific Advances[J]. *Engineering Proceedings*, 2022, 19(1): 35.
- [43] YU Zhen, LI Bao-qiang, CHU Jia-yu, et al. Silica in Situ Enhanced Pva/Chitosan Biodegradable Films for Food Packages[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 184: 214-220.
- [44] MUNIYASAMY S, OFOSU O, JOHN M J, et al. Mineralization of Poly (lactic acid)(PLA), Poly (3-Hydroxybutyrate-co-Valerate)(PHBV) and PLA/PHBV Blend in Compost and Soil Environments[J]. *Journal of Renewable Materials*, 2016, 4(2): 1-10.
- [45] MTIBE A, MOTLOUNG M P, BANDYOPADHYAY J, et al. Synthetic Biopolymers and Their Composites: Advantages and Limitations-an Overview[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2021, 42: 2100130.
- [46] TIAN Ying, HU Han, CHEN Chao, et al. Enhanced Seawater Degradation through Copolymerization with Diglycolic Acid: Synthesis, Microstructure, Degradation Mechanism and Modification for Antibacterial Packaging[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 447: 137535.

- [47] 倪瑞龙, 姚盼盼, 胡剑灿, 等. 水生环境中化学纤维及塑料的生物降解性能检测方法分析[J]. 中国纤检, 2022(9): 98-101.
- NI Rui-long, YAO Pan-pan, HU Jian-can, et al. Analysis of Detection Methods for Biodegradability of Chemical Fibers and Plastics in Aquatic Environment[J]. China Fiber Inspection, 2022(9): 98-101.
- [48] JACQUIN J, CHENG Jing-guang, ODOBEL C, et al. Microbial Ecotoxicology of Marine Plastic Debris: A Review on Colonization and Biodegradation by the "Plastisphere"[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 865.
- [49] XU Ya-zhou, DAI Song-lin, BI Liang-wu, et al. Catalyst-Free Self-Healing Bio-Based Polymers: Robust Mechanical Properties, Shape Memory, and Recyclability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 9338-9349.
- [50] SPASOJEVIC P, SESLIJA S, MARKOVIC M, et al. Optimization of Reactive Diluent for Bio-Based Unsaturated Polyester Resin: A Rheological and Thermomechanical Study[J]. Polymers, 2021, 13(16): 2667.
- [51] 王琳, 周淑红, 张萍, 等. 发达国家食品接触材料法规标准体系研究[Z]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局国际检验检疫标准与技术法规研究中心, 2017.
- WANG Lin, ZHOU Shu-hong, ZHANG Ping, et al. Research on the Regulatory Standards System of Food Contact Materials in Developed Countries[Z]. Beijing: National General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine International Inspection and Quarantine Standards and Technical Regulations Research Center, 2017.
- [52] MEHTA N, CUNNINGHAM E, ROY D, et al. Exploring Perceptions of Environmental Professionals, Plastic Processors, Students and Consumers of Bio-Based Plastics: Informing the Development of the Sector[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 26: 574-587.

责任编辑: 曾钰婵