综论

生物可降解食品包装材料的研究进展

胡预龙[1]，张如强[1*]，李文俊[1]，杨 玲[1]，龙 柱[2]

（1. 四川轻化工大学 生物工程学院 非木材纤维综合利用创新研究室，四川 宜宾 644000；2. 江南大学纺织科学与工程学院，江苏 无锡 214000）

摘要：生物可降解食品包装材料作为一种新兴的绿色可持续循环材料，因其原料易再生、使用后易降解、安全无害等性能，在食品包装领域得到了广泛的应用。该文综述了不同原料制备的食品包装材料，以及为满足市场上多样化的需求而开发的具有不同功能的生物可降解食品包装材料。并重点阐述了天然高分子（淀粉、纤维素、木质素、蛋白质）基食品包装材料和合成高分子（聚乳酸、聚乙烯醇）基食品包装材料的研究进展、降解机理以及工业化前景。其中，天然高分子基食品包装材料来源丰富、对人体无害，具有可成型性好、抗渗透性强等优点，而合成高分子基食品包装材料的透明度和机械性能更好，且两者在自然界中均可自然降解。最后，指出了目前生物可降解食品包装材料研究中面临的挑战以及在未来的发展中应更注重循环和可降解综合利用，并加大制备具有优异抗菌、防潮、透气等多功能的新型生物可降解食品包装材料，以满足不同类型的食品包装需求。

关键词：可降解性；可再生性；食品包装；高分子材料；降解机理

中图分类号：TS206.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1003-5214 (2025) 06-1211-10

Research progress on biodegradable food packaging materials

HU Yulong[1], ZHANG Ruqiang[1*], LI Wenjun[1], YANG Ling[1], LONG Zhu[2]

（1. *College of Bioengineering, Innovative Research Laboratory for Comprehensive Utilization of Non Wood Fibers, Sichuan University of Science & Technology, Yibin* 644000, *Sichuan, China*; 2. *College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi* 214000, *Jiangsu, China*）

Abstract: As an emerging green and sustainable recycling material, biodegradable food packaging materials have been widely used in the field of food packaging due to easy regeneration of raw materials, easy degradation after use, safety and harmlessness. Herein, the food packaging materials prepared from different raw materials, as well as biodegradable food packaging materials with different functions developed to meet the diverse needs in the market were reviewed. The research progress, degradation mechanism and industrialization prospects of natural polymer (starch, cellulose, lignin, protein)-based food packaging materials and synthetic polymer (polylactic acid, polyvinyl alcohol)-based food packaging materials were mainly elaborated. Among them, natural polymer-based food packaging materials were rich in sources, harmless to the human body, and had the advantages of good formability and strong permeability resistance, while synthetic polymer-based food packaging materials had better transparency and mechanical properties, and both could be naturally degraded. Finally, the challenges faced in the current research on biodegradable food packaging materials and that in future development were pointed out, more emphasis should be placed on recycling and degradable comprehensive utilization, and more efforts should be focused on new biodegradable materials with excellent antibacterial, moisture-proof, breathable and other multi-functional properties to meet different types of food packaging needs.

Key words: biodegradability; renewability; food packaging; polymers; degradation mechanism

收稿日期：2024-04-15; **定用日期：**2024-06-17; **DOI:** 10.13550/j.jxhg.20240308

基金项目：宜宾市科学技术局“揭榜挂帅”项目（2022JB009）；宜宾市科技局基础研究项目（2022JC001）

作者简介：胡预龙（2000—），男，硕士生，E-mail：337004674@qq.com。**联系人：**张如强（1990—），男，讲师，E-mail：zhangruqiang@suse.edu.cn。

塑料包装材料由于轻便、耐用、成本低廉以及出色的防护和密封特性，已在包装行业得到了广泛应用[1]，但也给环境带来了诸多负面影响，如资源消耗、污染以及海洋生物的死亡。此外，塑料作为一种合成材料，其制造过程不仅消耗大量的能源，还会消耗大量的水资源[2]。由于塑料包装材料的使用量极大，进而对原材料的需求也日益增加，加剧了自然资源的消耗。其次，废弃的塑料包装材料通常被堆放在垃圾填埋场或者焚烧，不仅会产生有害气体和废水，还对土壤和水体造成污染。大量的塑料废弃物堆积在自然环境中，还会破坏生态系统的平衡，对野生动植物造成危害。研究表明，约 85% 的海洋垃圾为塑料制品，而塑料包装材料正是海洋垃圾的主要来源之一[3]。丢弃的塑料包装材料很容易流入海洋，在海洋中被分解成微小颗粒，且易被海洋生物摄入，从而进入食物链，最终可能对人类健康产生影响[4]。相比之下，生物可降解食品包装材料来自于可再生资源，能在一定条件下迅速自然降解，减少对环境的负面影响。因此，生物可降解食品包装材料已成为研究和关注的焦点。

生物可降解食品包装材料是指分子链能被微生物（如细菌、霉菌、藻类等）在垃圾处理或自然环境中分解，生成无污染的水、CO_2 或甲烷等物质[5]。生物可降解食品包装材料（图 1）通常来自可再生资源，如植物纤维、淀粉和纸浆等，其生产过程中的资源消耗和对环境的影响较小[6]。

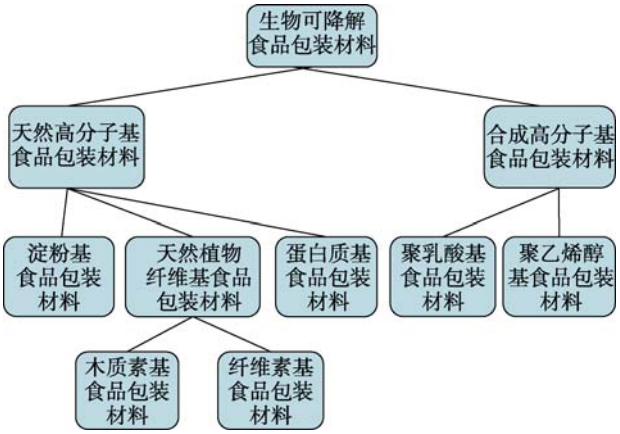

图 1　生物可降解食品包装材料的分类

Fig. 1　Classification of biodegradable food packaging materials

可降解材料能够在一定环境条件下迅速分解为无害物质，不会产生白色污染。生物可降解食品包装材料可用于包装食品，减少塑料污染，符合消费者对环保的需求。此外，由于食品包装材料直接接触食品，与饮食息息相关，更应关注食品包装材料对身体产生的影响。相关研究表明，传统塑料包装材料可能释放或迁移出对人体健康有害的化学物质，并对食品质量和安全构成潜在威胁[7]。而生物可降解食品包装材料由可再生资源制成，不含有害物质，对食品不会产生污染。因此，研究生物可降解食品包装材料对于食品安全、保护环境以及实现可持续发展具有重要的意义。

本文将详细介绍生物可降解食品包装材料的研究进展，重点阐述各类生物可降解食品包装材料的制备、优缺点、降解机理以及其工业化发展前景，并指出目前生物可降解食品包装材料研究中面临的挑战，最后对该类材料未来的研究方向和发展趋势进行展望。

1　生物可降解材料的研究进展

1.1　天然高分子基食品包装材料

1.1.1　淀粉基食品包装材料

淀粉是植物体内储存养分的主要物质，广泛存在于植物的根、茎、叶和果实中，且因其来源广泛、价格低廉、可再生而备受关注[8]。此外，淀粉还具有优良的成膜性和降解性，在食品包装领域具有广阔的应用前景[9]。淀粉基可降解生物薄膜是一种重要的食品包装材料，可防止被氧化和微生物污染，延长食品的保质期。因为淀粉通过形成半透性屏障来有效减少水分流失和氧气以及其他气体的迁移，从而延长果蔬、肉制品等食品的保质期。此外，其还具有良好的可降解性和可再生性，对环境友好。这一特性使淀粉基可降解生物薄膜在食品包装行业中具有较高的商业应用价值。

对于含水量较高的果蔬产品，双层结构的淀粉薄膜是理想的包装选择。ZHOU 等[10]开发了一种基于豌豆淀粉（PS）和聚乳酸（PLA）的双层食品包装薄膜，其中，亲水性的 PS 层作为内层吸收内部水分，而疏水性的 PLA 层则作为外层，可有效防止外部水分渗入。研究表明，淀粉/PLA 双薄膜表现出更出色的机械和水蒸气阻隔性能，可用于保鲜水果、蔬菜和其他食品，延长其货架寿命，减少食品浪费。此外，这种双层薄膜还具有可降解性，符合可持续发展的要求。然而，淀粉/PLA 材料的性能仍受到淀粉与 PLA 界面不相容性的限制，尚未达到实际使用的要求。CHEN 等[11]设计了一种基于玉米淀粉（CS）和 PLA 的双层食品包装膜，该膜的 CS 内层加入了活性桉树精油微胶囊（EOM），不仅增强了双层膜的抗氧化性能，也提升其抗菌特性。研究表明，该膜对呼吸效率的抑制作用较好，从而减少了蛋白质等有机物的损耗以及水分的流失，可使双孢蘑菇的保质期大大延长（图 2）。相较于传统的包装材料，

该薄膜具有环保、可降解、有效保鲜等特点，且制备方法和条件较为简单。因此，这种基于 CS 和 PLA 的复合薄膜可替代传统的石油基材料，减少对环境的影响，并随着人们对环保和可持续发展的需求不断增加，该复合薄膜有望在食品包装行业得到广泛应用。

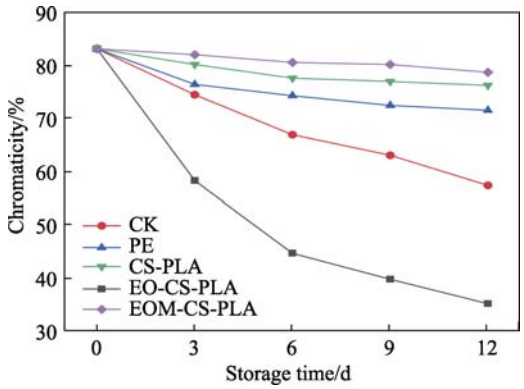

图 2　双孢蘑菇贮藏过程中白度的变化[11]

Fig. 2　Changes in whiteness of agaricus bisporus during storage[11]

肉制品易发生氧化和微生物污染等问题，利用淀粉基可生物降解材料制备了具有抗菌功能的蛋白质基食品包装膜，以延缓肉制品的变质过程。MORENO 等[12]研究发现，含有 *N*-*α*-月桂酰-精氨酸乙酯单盐酸盐的淀粉明胶薄膜能显著延长鸡胸肉片的保质期，且含有天然淀粉的薄膜能更好地保留鸡胸肉的品质。对于鱼虾等富含不饱和脂肪酸的水产品，由于双键易被光、热和氧气破坏，产生的氧化副产物对食品安全和经济都构成威胁。因此，开发适合这类产品的抗氧化淀粉基可生物降解食品包装材料，是一种绿色经济的解决方案。BAEK 等[13]采用溶液浇铸法将豇豆淀粉与马基莓提取物（MBE）复合制备了一种抗氧化膜。在 4 ℃下，由质量分数 2%的 MBE 制备的豇豆淀粉薄膜能有效延迟三文鱼样品中的脂质氧化，结果表明，掺入 MBE 的豇豆淀粉薄膜可用作抗氧化包装材料。MBE 增加了薄膜的溶解度和水蒸气的渗透性。然而，该抗氧包装材料由于其水溶性高，应用可能会受到限制，需进一步对其进行优化。此外，HUANG 等[14]研究发现，淀粉基食品包装技术不仅可用于延长食品保质期和制备可食用包装膜，还可作为制备可视化观察食品新鲜度淀粉膜的潜力。

综上可知，淀粉基可生物降解材料因其优良的成膜性能和降解性能，已成为果蔬、肉制品等食品包装的理想选择，有助于保持食品的新鲜度和延长其保质期。利用不同的材料与淀粉进行复合制备的淀粉基食品包装材料具有良好的抗氧化、抗菌性能和水蒸气阻隔性能；此外，含有可视化指标的淀粉基智能食品包装技术也为食品包装领域带来了新的发展方向，能为消费者提供直观的食品新鲜度信息，增强消费者的满意度。因此，淀粉基薄膜作为一种可生物降解材料，在食品包装领域的工业化前景广阔。

1.1.2　天然植物纤维基食品包装材料

1.1.2.1　纤维素基食品包装材料

与传统塑料包装材料相比，纤维素基食品包装材料在自然环境中可被微生物降解，且降解产物安全无害，成为食品包装材料的良好选择[15]。纤维素基食品包装材料可通过纤维素获得，具有良好的可再生性能；并可通过纤维素的循环利用以降低资源消耗和能源消耗。研究表明，在可降解食品包装领域，纤维素基食品包装材料具有良好的气体和水分阻隔性能，有助于延长食品保鲜期[16]。纤维素基食品包装材料还具有适度的机械性能，能对食品提供良好的保护；此外，纤维素基食品包装材料可通过添加一些功能性添加剂（如抗菌剂、抗氧化剂等）来增强包装材料的相关性能[17]。

ORMANLI 等[18]通过在纸上电喷涂富里酸和丝胶溶液，开发了一种纤维素基活性食品包装材料。研究表明，在梨的储存过程中，该活性食品包装材料可较好地延长梨的保质期。然而，保质期的长短取决于纸张表面的黏附力、电导率、物质的黏度和收集介质的表面张力。因此，该包装材料在不同类型保鲜产品的应用方面具有一定的局限性。HUANG 等[19]为解决包装过程中防水与阻隔的问题，开发了一种具有防水、高阻隔、抗菌等特点的纤维素基包装材料。首先，将市售微晶纤维素用长链硬脂酸改性，形成疏水微晶纤维素酯，然后与硬脂酸混合作为填料，用于甘蔗渣纤维纸的表面涂布。微晶纤维素酯/硬脂酸涂层纸（MSP）具有良好的拒水性和阻氧性，这是由于形成了连续的疏水膜，该膜完全覆盖了原甘蔗渣纤维纸的孔隙。此外，聚六亚甲基胍（PHMG）是化学接枝到 MSP 表面层的游离羧基，制得的 MSP-*g*-PHMG 样品表现出优异的抗菌性。与市售聚乙烯（PE）薄膜相比，制备的 MSP-*g*-PHMG 具有更好的鲜果保鲜性能，可更好地延长鲜果的保质期（图 3）。

综上可知，在食品包装领域，纤维素基食品包装材料展现出良好的气体和水分阻隔性能，有助于延长食品的保鲜期；此外，该材料因其可降解和可再生的特性能有效减轻对环境的压力，并可通过再生纤维素制备过程实现循环利用。然而，该材料在某些方面还存在不足，可采用多种方法（如电喷涂、添加微晶纤维素等）以提升纤维素基材料的耐水性、

和阻隔性能。因此，纤维素基可生物降解包装材料的研究为环保包装材料的开发提供了新的思路，解决了包装过程中的防水和阻隔问题，在未来食品包装行业具有潜在的工业化发展前景。

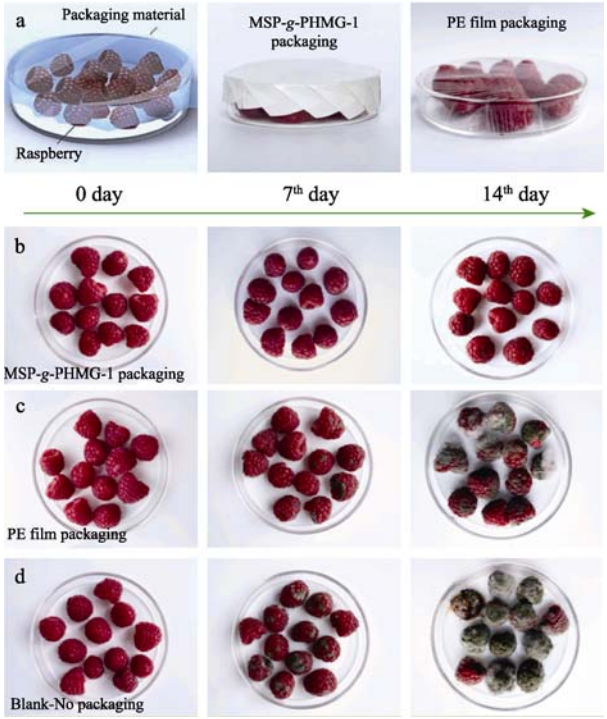

图 3　在 4 ℃和相对湿度约为 80%时包装材料对树莓贮藏保鲜的影响：不同树莓包装的示意图和照片（a）；用 MSP-*g*-PHMG-1（b）、市售 PE 膜（c）和对照（d）包装的树莓在不同时间（0~14 d）的储存结果[19]

Fig. 3　Effect of packaging materials on raspberry preservation during storage at 4 ℃ and relative humidity of about 80%: Schematic diagrams and photos of different raspberry packaging (a); Storage results of raspberries packaged with MSP-*g*-PHMG-1 (b), commercial PE film (c) and control film (d) at different time (0~14 d)[19]

1.1.2.2　木质素基食品包装材料

木质素是一类普遍存在于植物细胞壁中的有机化合物，具有高相对分子质量、高强度和可生物降解等特点。研究表明，木质素基食品包装材料具有良好的抗撕裂和抗压性能，能有效地保护食品的完整性和品质[20]；其次，木质素基食品包装材料具有较高的耐热性能，能在较高的温度下保持结构稳定性和物理性能，还具有良好的保湿性能，可有效保持食品的湿度和口感；此外，木质素中的酚类化合物能抑制细菌的毒性，与细胞质膜相互作用，防止生物膜的形成，进而赋予了木质纤维素基食品包装材料一定的抗菌性能[21]。因此，木质素在食品包装领域具有重要的应用潜力和优势[22]。

木质素由于天然存在的酚类结构，还可作为有效的自由基清除剂。研究表明，许多种类的木质素具有比已知抗氧化剂（如苯丙烷、姜黄素等）更高的抗氧化活性[23]。YUAN 等[24]通过在酚化木质素/纤维素薄膜（RCPL30）上构建 *ε*-聚赖氨酸（*ε*-PL）抗菌表面来制备可降解的多功能木质素基薄膜。研究表明，阴离子酚化木质素/纤维素和阳离子 *ε*-PL 的静电相互作用和氢键的精细控制可有效定制结构和薄膜性能。*ε*-PL 的加入增强了酚化木质素/纤维素膜的抗菌性能、疏水性、水蒸气和氧阻隔能力。因此，该薄膜在活性食品包装领域具有广泛的应用潜力。

综上可知，木质素基薄膜材料的制备使用了可再生木质素作为原料，属于可降解再生的食品包装材料。木质素基材料还具有良好的耐热性、保湿性和抗菌性，可用于制作多功能食品包装薄膜；此外，这类薄膜还具有优异的物理和机械性能，如高强度和柔韧性，使其适用于更多的食品包装应用领域。因此，随着生物可降解包装材料需求的不断增加，这种木质素基食品包装材料具有广阔的工业化发展前景。

1.1.3　蛋白质基食品包装材料

蛋白质作为重要的生物大分子，广泛存在于各种生物体中[25]。蛋白质基食品包装材料可通过提取和纯化食品中的蛋白质，或利用农副产品中的蛋白质来制备。蛋白质基食品包装材料不仅具有优异的物理性质，还具有生物降解性，在自然环境中可迅速降解，对环境无污染；其次，蛋白质基食品包装材料还具有优异的氧气屏障性能，能有效阻隔氧气渗透，延长食品的保质期；此外，蛋白质基食品包装材料还具有良好的物理性能，包括较高的机械强度和良好的耐热性能，这些特性使其成为食品包装领域的理想选择。蛋白质基材料被广泛应用于制造食品包装的可降解生物薄膜，如明胶、酪蛋白、玉米醇溶蛋白、乳清蛋白都可用于制造可生物降解的食品包装薄膜[26]。这些蛋白质易于加工成薄膜，由可再生资源获取，被视为传统合成塑料的可持续替代品；此外，蛋白质基生物聚合物因其具有强大的气体阻隔性能和足够的机械强度，在食品包装领域具有较大的应用潜力[27]。然而，蛋白质基食品包装材料耐温性能较差，可能不适用于某些高温环境。表 1 列出了不同类型的蛋白质基食品包装薄膜，这些薄膜根据所选蛋白质的不同而具有各自的优势。鉴于蛋白质基生物聚合物是食品包装领域中最具潜力的材料之一，应致力于开发出功能更全面的可降解、可再生的食品包装薄膜。

综上可知，不同的天然高分子材料来源丰富、可生物降解、对人体无害，属于环境友好型环保材料，在生物可降解食品包装材料领域具有广泛的应

用潜力。然而，由于天然高分子的来源不同，不同天然高分子基食品包装材料相关的性能又有所不同。淀粉基食品包装材料的透明度更高，而纤维素基食品包装材料和木质素基食品包装材料的机械性能更好；且纤维素基食品包装材料和蛋白质基食品包装材料的抗渗透性更好。此外，淀粉在潮湿环境下容易吸水膨胀，纤维素的加工难度较大，而木质素和蛋白质的降解速度较慢，这些特性又限制了生物可降解食品包装材料的制备和应用。因此，未来应加大天然高分子基材料的研究力度，以克服其相关缺陷，制备性能优异的天然高分子基生物可降解食品包装材料。

表 1　不同类型的蛋白质基食品包装薄膜

Table 1　Different types of protein-based food packaging films

序号	涂层/薄膜类型	增塑剂/生物活性成分/添加剂	优势	参考文献
1	糖基化大豆分离蛋白	甘油	增强机械性能	[28]
2	醇溶蛋白	百里香油、柠檬酸和乳链球菌肽的混合物	开发的纤维能够有效地灭活广谱微生物	[29]
3	醇溶蛋白	酚类化合物（迷迭香酸、咖啡酸及其衍生物）	食品包装结构中的抗氧化涂层有助于保护亲水性和亲油性食品	[30]
4	玉米醇溶蛋白和 PLA	香芹酚	提高热稳定性，延长全麦面包的保质期	[31]
5	玉米醇溶蛋白活性薄膜	石榴皮提取物	更好的热稳定性	[32]
6	醇溶蛋白	十二烷	保持温度控制，如保护冷链	[33]
7	醇溶蛋白	1,2-环氧-3-氯丙烷	提高薄膜的断裂强度和耐水性能	[34]
8	醇溶蛋白	卡拉胶含质量分数 1%、5%、10%和 20%的黏土和质量分数 10%的甘油	显著增强了耐水性、渗透性和柔韧性	[35]
9	醇溶蛋白	溶菌酶	增加抗菌剂	[36]
10	醇溶蛋白	聚丙烯	改善阻隔性、透氧性	[37]
11	醇溶蛋白	Zataria multiflora Boiss 精油	有效的抗菌活性	[38]
12	醇溶蛋白	银纳米团簇	在食品包装材料中具有巨大的抗菌应用潜力	[39]
13	玉米醇溶蛋白/壳聚糖包装	Cinnamodendron dinisii 精油	提高抗氧化和抗菌活性	[40]
14	细菌纤维素	玉米醇溶蛋白纳米颗粒	提高机械性能，如抗拉强度和刚度以及热稳定性	[41]
15	醇溶蛋白	麝香草酚/环糊精	抑制肉类样本上细菌的生长	[42]
16	玉米醇溶蛋白和醋酸纤维素	大蒜精油和 β-环糊精	与玉米醇溶蛋白薄膜相比，它们显示出相当大的改善，玉米醇溶蛋白薄膜脆而易碎，以至于损害了它们的操作和抗菌活性	[43]
17	聚羟基丁酸酯-共戊酸酯	玉米醇溶蛋白中间层	显著改善多层膜的阻氧性能	[44]
18	麸质	亚麻籽胶、低聚原花青和月桂酸	改善面筋膜的阻隔、机械和防腐性能	[45]
19	麸质	甘油	改进的机械和水蒸气阻隔性能	[46]
20	麸质	香芹酚和肉桂醛	提高抗菌活性	[47]
21	热塑性麸质	聚 ε-己内酯	增强疏水性	[48]

1.2　合成高分子基食品包装材料

1.2.1　PLA 基食品包装材料

PLA 是一种由生物发酵和聚合反应制成的生物基聚合物。PLA 作为一种生物可降解材料，具有对环境影响小、可再生、可回收等特点，因此，在包装、纺织、医疗、3D 打印等领域得到广泛应用。PLA 还具有良好的生物相容性、低毒性、易于加工和可生物降解性[49]，可在自然界中通过微生物的作用被分解为水和 CO_2，从而实现循环利用，减少对环境的影响。然而，PLA 的热稳定性较差、机械强度较低。为改善这些缺陷，可通过与其他材料复合，如纤维素、淀粉、蛋白质等，制备出 PLA 基食品包装材料，以提高其相关性能，满足不同领域的需求。

ZHOU 等[50]以 PS 和 PLA 为原料，通过层层堆叠的方法制备了“三明治”结构的薄膜。如图 4 所示，以 PS 和 PLA 层为边界层、辛烯基琥珀酸酐改性的 PS（OMPS）层为中间层，设计了具有三明治结构的可生物降解膜。其中，PS 层和 PLA 层提供了保护水果的功能，而中间的 OMPS 层则增强了薄膜的机械性能和阻隔性能。通过对薄膜的物理性能和水果保鲜效果的测试，证明了这种三明治结构薄膜具有较长的保鲜期限和良好的保鲜效果。因此，该薄膜成功地解决了水果保鲜期限较短的问题，并为水果保鲜提供了可行的解决方案，在食品包装领

域具有广阔的应用前景。

于震宇等[51]对 PLA 薄膜在腌制果蔬包装中的应用进行了研究。研究表明，PLA 薄膜对腌制果蔬具有显著的气调保鲜效果。PLA 薄膜具有较好的气体选择透过性，可进行袋内气体的调节，实现腌制果蔬的气调保鲜效果，延缓腌制果蔬变质，提高其保质期。SWAROOP 等[52]采用溶剂流延法，在 PLA 生物聚合物中填充 MgO 纳米颗粒。相较于原始 PLA 薄膜，当添加质量分数 2%的 MgO 时，PLA/MgO 复合食品包装薄膜的拉伸强度和氧气阻隔性分别提升了 29%和 25%；同时，PLA/MgO 复合食品包装薄膜还展现出良好的机械、阻隔、耐热和抗菌性能。MgO 是一种天然的金属氧化物，具有抗菌和紫外线屏蔽性能，将 MgO 纳米颗粒与 PLA 相结合，可在食品包装中更好地保护和延长货物的保质期。

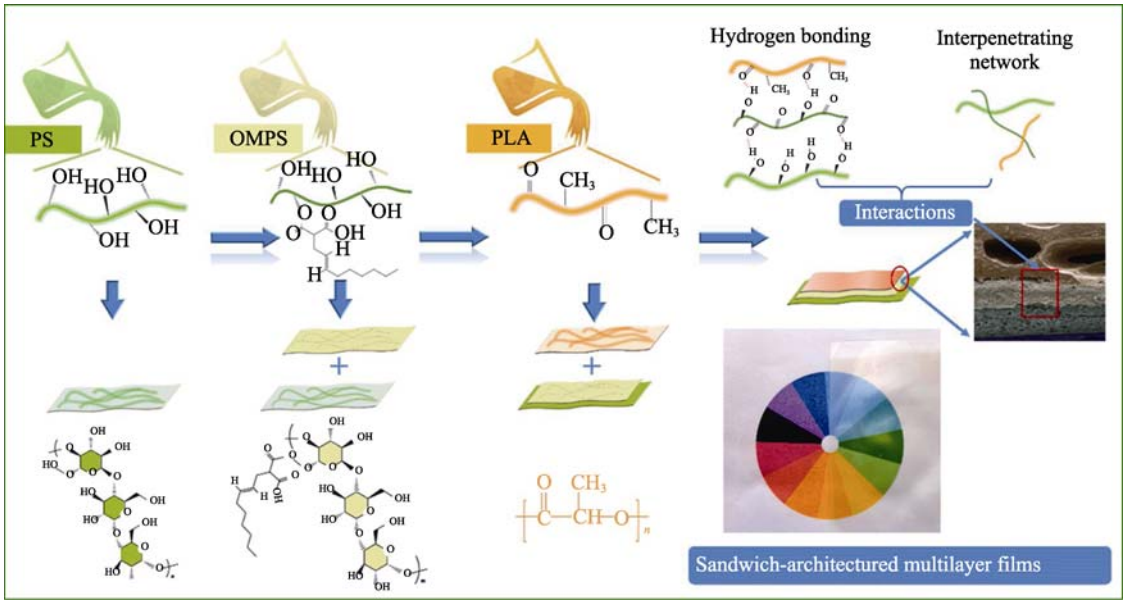

图 4　由 PS、OMPS 和 PLA 制备可生物降解夹层结构薄膜的示意图[50]

Fig. 4　Schematic illustration of preparation of biodegradable sandwich-architectured film from PS, OMPS and PLA[50]

综上可知，通过层层堆叠的方法制备的三明治结构薄膜可提升 PLA 基食品包装材料的机械、阻隔、保鲜等性能。例如：在 PLA 基食品包装薄膜中添加 MgO 纳米颗粒，不仅可提高 PLA 基食品包装薄膜的拉伸强度和氧气阻隔性，还可赋予其抗菌性能。特别是 PLA 基食品包装薄膜通过溶剂共混制备相对简单，其在腌制果蔬包装领域具有较好的保鲜效果，未来有望应用于食品包装行业。

1.2.2　聚乙烯醇（PVA）基食品包装材料

PVA 作为一种半结晶聚合物，以其优异的物理化学性质、无毒性和可生物降解等特性已广泛应用于各类包装行业。然而，PVA 的耐水性较差，水蒸气阻隔性能和紫外线阻隔性能不足，以及与常规聚合物相比力学性能较差，这些因素限制了其在食品包装领域的应用。

张群利等[53]使用 PVA、淀粉（ST）和凤仙透骨草提取物（IBE）制备了一种抗菌复合膜，并对其力学、光学、阻隔和抗菌性能进行了测试。结果表明，添加凤仙透骨草提取物的复合膜对大肠杆菌、白色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌具有良好的抑菌作用，并具有良好的力学强度和阻光性能（图 5）。该复合膜还表现出良好的氧气阻隔性能。因此，PVA/ST/IBE 复合膜可作为绿色环保、抗菌型的食品包装材料，具有潜在的应用价值。

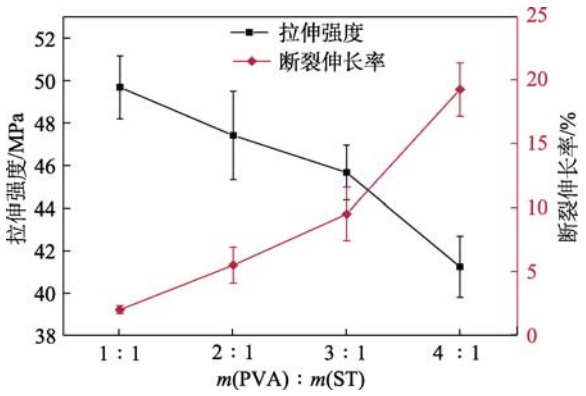

图 5　PVA 与 ST 不同质量比下制得 PVA/ST/IBE 膜的拉伸强度和断裂伸长率[53]

Fig. 5　Tensile strength and elongation at break of PVA/ST/IBE films with different mass ratios of PVA to ST[53]

刘毅等[54]将不同比例的香芹酚（CAR）添加到明胶（GEL）和 PVA 的纺丝溶液中，制备了不同含量的纤维膜。研究表明，CAR 的添加对纤维膜的抗

氧化性能有显著的影响。随着 CAR 添加量的增加，抗氧化性能增强，可能是 CAR 与 GEL/PVA 体系中的分子发生相互作用导致的。该研究为制备具有抗氧化性能的CAR/GEL/PVA纤维膜提供了一种方法。尽管 PVA 在食品包装材料方面存在一些性能缺陷，但通过与其他材料（如 IBE、CAR 等）的复合和改性，可显著提高其相关性能，使其在食品包装领域具有更广泛的应用潜力。

综上可知，与天然高分子基食品包装材料相比，合成高分子基食品包装材料的透明度高和机械性能更好，两者在自然界中均可自然降解，不会对环境造成污染。但合成高分子基食品包装材料的降解速度较慢；此外，PLA 基食品包装材料易受阳光影响而变黄变脆，PVA 基食品包装材料则易受潮变形，耐热性较差，且其制备成本较高，不利于工业化生产。因此，未来可通过改性来改善合成高分子基食品包装材料的自然降解速度，也可与性能互补的材料相结合，取长补短，制备性能更加优异的合成高分子基生物可降解食品包装材料。

2　生物可降解食品包装材料的降解机理

生物可降解食品包装材料的来源丰富，种类繁多，除了文中列举的常见类型外，还有羧甲基纤维素（CMC）、聚 3-羟基烷酸酯（PHA）、聚 ε-己内酯（PCL）基等可降解食品包装材料。如表 2 所示，常见的淀粉、纤维素、木质素、蛋白质、PLA 和 PVA 基等食品包装材料在自然环境条件下能被微生物降解，最终生成水和 CO_2 等物质，不会造成环境污染。

2.1　淀粉基食品包装材料的降解机理

相较于传统塑料，淀粉是快速降解材料，但由于淀粉的半结晶结构，结晶区对酶、水及化学试剂有较强的抵抗能力，因此，淀粉基食品包装材料在降解时要对其进行预降解处理，然后采用化学降解、生物酶解或生物化学降解法处理预降解后的产物，实现有效降解的目的。生物酶解是实现淀粉有效降解的重要手段。淀粉酶能够水解淀粉，使其转化为糊精等中间产物，并进一步糖化生成麦芽糖乃至葡萄糖。在此过程中，淀粉吸水率较高，增加了水分子攻击淀粉基材料中酯基的机会，导致其降解速率高于纯聚合物。在降解过程中，淀粉基材料被分解成短链或低聚物，随后被微生物同化和矿化，最终形成 CO_2、水、甲烷、生物质和矿物盐等无害物质。利用淀粉的可降解技术，可开发出淀粉基生物可降解食品包装材料，这对环境保护具有重要意义[55]。

2.2　纤维素基食品包装材料的降解机理

在自然界中，纤维素降解的主要途径依赖于微生物产生的纤维素酶。这些酶具有底物特异性，分为内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β-1,4-葡萄糖苷酶，它们是糖苷水解酶的混合物，可将纤维素彻底降解为葡萄糖。这些酶在食品包装材料领域具有重要的应用价值，它们能将纤维素高效转化为葡萄糖。具体而言，内切葡聚糖酶的活性对纤维素的降解和转化至关重要，能释放纤维素链中的寡糖片段，形成新的链端，为进一步水解提供条件；而外切葡聚糖酶或纤维素生物水解酶则作用于纤维素末端，释放葡萄糖或纤维二糖；β-1,4-葡萄糖苷酶对纤维素转化为葡萄糖的转化步骤起关键作用。纤维素酶在纤维素基食品包装材料的降解过程中发挥着至关重要的作用[56]。

2.3　木质素基食品包装材料的降解机理

木质素结构的复杂性和不均匀性使得木质素的降解比纤维素更为困难。然而，木质素酶，如细胞外过氧化物酶（木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶）和细胞外酚氧化酶（漆酶），在木质素降解过程中起关键作用。其中，漆酶通过解聚木质素并氧化多酚转化为醌，而木质素过氧化物酶的催化过程需要过氧化氢的协助。因为过氧化氢催化参与多步电子转移形成自由基，如苯氧基自由基和藜芦醇自由基。这些自由基可通过一系列反应，如酚类化合物的聚合、侧链断裂、去甲基化、C—C 断裂和芳香环开环的偶联反应，催化木质素中 β-O-4 醚键和 C_α—C_β 键的断裂。锰过氧化物酶由于其高氧化还原潜力，对酚型木质素具有显著的降解作用，能将酚型木质素氧化，随后进行去甲基化和烷基—苯基键断裂，C_α—C_β 键断裂。通过木质素酶的作用，木质素被氧化成不同的自由基，形成醌、芳香醛、醇和开环产物，这些产物能实现木质素基食品包装材料的生物降解。这一过程在木质素生物可降解食品包装材料中具有重要价值，因为木质素的降解能够为微生物提供营养物质，促进包装材料的自然降解，从而减少环境污染[56]。

2.4　蛋白质基食品包装材料的降解机理

蛋白质是由许多氨基酸通过肽键连接起来的大分子化合物。在微生物的生长过程中，一些微生物能够合成并分泌蛋白酶，将这些蛋白质分解成短肽。这些短肽在肽酶的作用下进一步分解成氨基酸。氨基酸是微生物合成新细胞质的原料，但在厌氧和缺乏碳源的条件下，它们也可被某些细菌用作能源和碳源物质，以维持机体的生长。微生物分解氨基酸的方式多种多样，但主要是通过脱羧和脱氨作用。对于蛋白质基生物可降解食品包装材料而言，这些微生物的氨基酸分解过程具有重要价值。由于该材

料通常由蛋白质和其他有机物质构成，微生物通过降解这些物质获得营养，从而促进包装材料的自然降解。这一过程不仅可减少环境污染，还能为微生物提供生长所需的营养物质，促进降解过程，从而实现食品包装的可持续性[57]。

2.5　PLA 基食品包装材料的降解机理

PLA 由于其生物降解性和可再生性，受到了广泛关注。然而，应用限制主要在于其热稳定性差、韧性低的问题。在水环境中，PLA 的酯基会随机断裂，产生具有端羧基和端羟基的聚合物分子链，生成的羧基会对水解产生催化作用，促进 PLA 的内部降解，出现自催化现象。随着 PLA 分子主链的断裂，其相对分子质量和力学性能迅速下降，生成大量的低聚物和乳酸单体等产物。这些产物最终会被进一步降解为 CO_2 和水。这一过程在 PLA 基生物可降解食品包装材料中具有重要价值，因为 PLA 的降解产物可被微生物利用，从而促进包装材料的自然降解，实现食品包装的可持续性[58]。

2.6　PVA 基食品包装材料的降解机理

PVA 基食品包装材料的降解主要依赖微生物菌种体内降解酶的降解作用。目前，对 PVA 降解酶的研究已经深入到特定的酶——PVA 氧化酶（仲醇氧化酶）、PVA 脱氢酶和氧化型 PVA 水解酶（β-双酮水解酶）。由于研究的菌种不同，这些降解酶的组合也各不相同，主要的组合是 PVA 氧化酶与氧化型 PVA 水解酶组合以及 PVA 脱氢酶与氧化型 PVA 水解酶组合。这些不同的组合方式对应着不同的降解机理。

目前，对降解酶作用机理的研究已形成一些共识：PVA 降解酶的降解作用主要分两步进行。第一步中，PVA 氧化酶（或 PVA 脱氢酶）将 PVA 氧化脱氢成酮基化合物，这一步通常在 O_2（或有吡咯喹啉醌）存在下进行。关于第二步的反应，有 2 种观点：一种观点认为，PVA 的羟基在催化作用下被氧化为酮基，然后在 PVA 水解酶的作用下被裂解；另一种观点则认为，由于酮基型 PVA 分子结构不稳定，可能会自发发生水解反应，而 PVA 水解酶在这一过程中可能加速了氧化型 PVA 的裂解反应。这些研究对于 PVA 基生物可降解食品包装材料的后续处理具有重要的意义。通过了解并优化这些降解酶的组合和作用机理，可开发出更高效、更环保的 PVA 基生物可降解食品包装材料，从而实现食品包装的可持续发展[59]。

表 2　不同类型食品包装材料优缺点

Table 2　Advantages and disadvantages of different types of food packaging materials

原料类型	优点	缺点
淀粉	来源丰富、可生物降解、无毒性、透明度高、可成型性好	在潮湿环境下容易吸水膨胀、机械性能较差、可降解性能有限
纤维素	来源广泛、可生物降解、无毒性、透明度较高、抗渗透性好、机械性能较强	加工难度较大、生物降解速度较慢
木质素	来源丰富、可生物降解、机械性能较好、具有一定的防水性能	成型性较差、加工难度大、容易受潮变形、生物降解速度较慢
蛋白质	来源广泛、可生物降解、无毒性、可成型性好、抗渗透性强	机械性能较差、易受湿气影响、易变形、生物降解速度较慢
PLA	生物降解性能好、透明度高、机械性能较好、无毒性、可成型性强	成本较高、耐热性差、易受阳光影响而变黄变脆、生物降解速度较慢
PVA	可生物降解、透明度高、机械性能较好、无毒性、化学稳定性强	成本较高、易受潮变形、生物降解速度相对较慢、耐热性较差

3　结束语与展望

随着国家绿色可持续发展战略的提出和“限塑令”的实施以及人们对环保、健康、安全意识的日益增强，传统塑料包装材料的生产和使用受到限制，促使产业向更环保、可持续的方向转型，生物可降解食品包装材料逐渐成为新宠。无论是天然高分子还是合成高分子的生物可降解食品包装材料，其原料来源丰富，且可自然降解，不会对环境造成污染，具有巨大的发展前景。但现阶段所制备的生物可降解食品包装材料仍存在易脆、生产成本高和热稳定性不足等问题，这些问题并不会影响生物可降解食品包装材料在食品包装领域中的重要地位，反而成为诸多学者研究的方向。

与国外相比，国内在生物可降解食品包装材料领域的研发投入不足、研究水平相对较低，缺乏相关的行业标准与规范。生物可降解食品包装材料的研究应加大研发投入，提升生物可降解食品包装材料的制备技术水平，并加强与国外食品包装相关领域专家的合作与交流，制定统一的生物可降解食品

包装材料行业标准和规范；还应加强高校与食品包装企业间的合作交流，根据市场需求研发相应的生物可降解食品包装材料；此外，在未来的发展中应更加注重循环利用和可降解综合利用，实现资源的最大化利用和减少环境污染。应加大生物可降解食品包装材料的研究，制备具有优异抗菌、防潮、透气等多功能的新型可降解食品包装材料，以满足不同类型的食品包装需求。

参考文献：

[1] HOSSAIN M S. People's attitudes regarding plastics and microplastics pollution: Perceptions, behaviors, and policy implications[J]. Marine Policy, 2024, 165: 106219.

[2] CHEN Y, AWASTHI A K, WEI F, *et al*. Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts[J]. Science of the Total Environment, 2021, 752: 141772.

[3] OUYANG X G, PANTI C, CANICCI S, *et al*. Impact of marine debris on marine ecosystems and organisms[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1136431.

[4] ZHONG W Z (钟宛真), SHAN B (单斌), TAN W Q (谭伟强), *et al*. Advances on photocatalytic treatment of microplastics in water[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2023, 40(6): 1176-1186.

[5] WANG T Y (汪天宇), WANG X J (王晓娟). Research progress of biodegradable nanomaterials in food packaging[J]. New Chemical Materials (化工新型材料), 2024, 52(S1): 137-142.

[6] PANOU A, KARABAGIAS I K. Biodegradable packaging materials for foods preservation: Sources, advantages, limitations, and future perspectives[J]. Coatings, 2023, 13(7): 1176.

[7] WINIARSKA E, JUTEL M, ZEMELKA-WIACEK M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks[J]. Environmental Research, 2024, 251(2): 118535.

[8] AGARWAL S, SINGHAL S, GODIYA C B, *et al*. Prospects and applications of starch based biopolymers[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2023, 103(18): 6907-6926.

[9] THAKUR R, PRISTIJONO P, SCARLETT C J, *et al*. Starch-based films: Major factors affecting their properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 1079-1089.

[10] ZHOU X M, YANG R D, WANG B, *et al*. Development and characterization of bilayer films based on pea starch/polylactic acid and use in the cherry tomatoes packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 222: 114912.

[11] CHEN M L, YAN X R, CHENG M, *et al*. Preparation, characterization and application of poly(lactic acid)/corn starch/eucalyptus leaf essential oil microencapsulated active bilayer degradable film[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 195: 264-273.

[12] MORENO O, ATARÉS L, CHIRALT A, *et al*. Starch-gelatin antimicrobial packaging materials to extend the shelf life of chicken breast fillets[J]. LWT, 2018, 97: 483-490.

[13] BAEK S K, KIM S, SONG K B. Cowpea starch films containing maqui berry extract and their application in salmon packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100394.

[14] HUANG X P, WANG F F, HU W K, *et al*. Smart packaging films based on corn starch/polyvinyl alcohol containing nano SIM-1 for monitoring food freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 256(1): 128373.

[15] AGARWAL S, SINGHAL S, GODIYA C B, *et al*. Prospects and applications of starch based biopolymers[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2023, 103(18): 6907-6926.

[16] ZHANG S F (张素风), LIN R (林瑞), LIU Y L (刘亚丽), *et al*. Research progress of cellulose-based packaging barrier film[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2022, 39(11): 2225-2234.

[17] SAEDI S, GARCIA C V, KIM J T, *et al*. Physical and chemical modifications of cellulose fibers for food packaging applications[J]. Cellulose, 2021, 28(14): 8877-8897.

[18] ORMANLI E, ULUTURK B A, BOZDOGAN N, *et al*. Development of a novel, sustainable, cellulose-based food packaging material and its application for pears[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136719.

[19] HUANG H B, MAO L, WANG W, *et al*. A facile strategy to fabricate antibacterial hydrophobic, high-barrier, cellulose papersheets for food packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123630.

[20] BASS G F, EPPS T H. Recent developments towards performance-enhancing lignin-based polymers[J]. Polymer Chemistry, 2021, 12(29): 4130-4158.

[21] ANUSHIKHA, GAIKWAD K K. Lignin as a UV blocking, antioxidant, and antimicrobial agent for food packaging applications[J/OL]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03707-3.

[22] ZHOU Y J (周逸君), JIA L (贾璐), YUAN H L (袁豪黎), *et al*. Research progress in the preparation and application of lignin-derived composite film materials[J]. New Chemical Materials (化工新型材料) , 2024, 52(4): 1-7.

[23] PONOMARENKO J, LAUBERTS M, DIZHBITE T, *et al*. Antioxidant activity of various lignins and lignin-related phenylpropanoid units with high and low molecular weight[J]. Holzforschung, 2015, 69(6): 795-805.

[24] YUAN H, YE H C, YOU T T, *et al*. Sustainable and multifunctional cellulose-lignin films with excellent antibacterial and UV-shielding for active food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108355.

[25] GÓMEZ-ESTACA J, GAVARA R, CATALA R, *et al*. The potential of proteins for producing food packaging materials: A review[J]. Packaging Technology and Science, 2016, 29(4/5): 203-224.

[26] REN J X (任佳欣), YU S Y (遇世友), XU X K (许锡凯), *et al*. Application research progress of edible protein film in food packaging[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2020, 41(9): 320-326.

[27] ZHEN N, WANG X Y, LI X, *et al*. Protein-based natural antibacterial materials and their applications in food preservation[J]. Microbial Biotechnology, 2022, 15(5): 1324-1338.

[28] ZHANG H J, WANG S N, ZHENG X Z, *et al*. Effect of glycosylation on the mechanical properties of edible soy protein packaging film[J]. European Food Research and Technology, 2014, 238: 1049-1055.

[29] AYTAC Z, HUANG R, VAZE N, *et al*. Development of biodegradable and antimicrobial electrospun zein fibers for food packaging[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(40): 15354-15365.

[30] MORENO M A, ORQUEDA M E, GÓMEZ-MASCARAQUE L G, *et al*. Crosslinked electrospun zein-based food packaging coatings containing bioactive chilto fruit extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 496-505.

[31] ALTAN A, AYTAC Z, UYAR T. Carvacrol loaded electrospun fibrous films from zein and poly(lactic acid) for active food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 48-59.

[32] CUI H, SURENDHIRAN D, LI C, *et al*. Biodegradable zein active film containing chitosan nanoparticle encapsulated with pomegranate peel extract for food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100511.

[33] PÉREZ-MASIÁ R, LÓPEZ-RUBIO A, LAGARÓN J M. Development of zein-based heat-management structures for smart food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 182-191.

[34] YAMADA K, TAKAHASHI H, NOGUCHI A. Improved water resistance in edible zein films and composites for biodegradable food packaging[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1995, 30(5): 599-608.

[35] SANCHEZ-GARCIA M D, HILLIOU L, LAGARON J M. Nanobiocomposites of carrageenan, zein, and mica of interest in food packaging and coating applications[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(11): 6884-6894.
[36] MECITOĞLU Ç, YEMENICIOĞLU A, ARSLANOĞLU A, *et al*. Incorporation of partially purified hen egg white lysozyme into zein films for antimicrobial food packaging[J]. Food Research International, 2006, 39(1): 12-21.
[37] OZCALIK O, TIHMINLIOGLU F. Barrier properties of corn zein nanocomposite coated polypropylene films for food packaging applications[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(4): 505-513.
[38] KASHIRI M, CERISUELO J P, DOMÍNGUEZ I, *et al*. Zein films and coatings as carriers and release systems of Zataria multiflora Boiss. Essential oil for antimicrobial food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 260-268.
[39] MEI L, TENG Z, ZHU G Z, *et al*. Silver nanocluster-embedded zein films as antimicrobial coating materials for food packaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(40): 35297-35304.
[40] XAVIER L O, SGANZERLA W G, ROSA G B, *et al*. Chitosan packaging functionalized with Cinnamodendron dinisii essential oil loaded zein: A proposal for meat conservation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 169: 183-193.
[41] LI Q, GAO R H, WANG L Y, *et al*. Nanocomposites of bacterial cellulose nanofibrils and zein nanoparticles for food packaging[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(3): 2899-2910.
[42] AYTAC Z, IPEK S, DURGUN E, *et al*. Antibacterial electrospun zein nanofibrous web encapsulating thymol/cyclodextrin-inclusion complex for food packaging[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 117-124.
[43] MARQUES C S, SILVA R R A, ARRUDA T R, *et al*. Development and investigation of zein and cellulose acetate polymer blends incorporated with garlic essential oil and *β*-cyclodextrin for potential food packaging application[J]. Polysaccharides, 2022, 3(1): 277-291.
[44] FABRA M J, LOPEZ-RUBIO A, LAGARON J M. High barrier polyhydroxyalcanoate food packaging film by means of nanostructured electrospun interlayers of zein[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(1): 106-114.
[45] LIU R, CONG X, SONG Y S, *et al*. Edible gum-phenolic-lipid incorporated gluten films for food packaging[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(6): 1622-1630.
[46] HERNÁNDEZ-MUÑOZ P, KANAVOURAS A, NG P K, *et al*. Development and characterization of biodegradable films made from wheat gluten protein fractions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(26): 7647-7654.
[47] GÓMEZ-HEINCKE D, MARTÍNEZ I, PARTAL P, *et al.* Development of antimicrobial active packaging materials based on gluten proteins[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(10): 3432-3438.
[48] GUTIÉRREZ T J, MENDIETA J R, ORTEGA-TORO R. In-depth study from gluten/PCL-based food packaging films obtained under reactive extrusion conditions using chrome octanoate as a potential food grade catalyst[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106255.
[49] AURAS R A, LIM L T, SELKE S E, *et al*. Poly(lactic acid): Synthesis, structures, properties, processing, applications, and end of life[M]. John Wiley & Sons, 2022.
[50] ZHOU X M, CHENG R, WANG B, *et al*. Biodegradable sandwich-architectured films derived from pea starch and polylactic acid with enhanced shelf-life for fruit preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117117.
[51] YU Z Y (于震宇), MA Y P (马艳萍). Preparation of selective permeable polylactic acid film and modified atmosphere fresh-keeping effect of pickled fruits and vegetables[J]. China Condiment (中国调味品), 2021, 46(4): 137-140.
[52] SWAROOP C, SHUKLA M. Nano-magnesium oxide reinforced polylactic acid biofilms for food packaging applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 113: 729-736.
[53] ZHANG Q L (张群利), MA R B (马瑞博), CUI L L (崔琳琳). Preparation and properties of polyvinyl alcohol/starch/impatiens balsamina extract antibacterial composite films[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2023, 40(10): 2214-2221.
[54] LIU Y (刘毅), LI B L (李柏良), GAO B S (高宝善), *et al*. Fabrication and antioxidant properties of carvacrol/gelatin/polyvinyl alcohol fibrous membranes[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2023, 40(9): 1910-1918.
[55] GAO S Y (高书燕), LI J D (李家栋), CHEN Y (陈野), *et al*. Research progress in starch based biodegradable materials[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition) (河南师范大学学报: 自然科学版), 2023, 51(5): 1-14, 181.
[56] HAN Y J (韩宇杰), CHANG X (常潇), XIANG H (向海), *et al*. Research progress on low-temperature degradation of straw[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition (动物营养学报), 2023, 35(6): 3528-3536.
[57] CHEN G A (陈公安), QI Y L (戚严磊). Completely biodegradable protein plastics[J]. Tianjin Chemical Industry (天津化工), 2006, 20(3): 31-33.
[58] LI Y Z (李玉竹), YAO L H (姚利辉), YE S Q (叶世强), *et al*. Research progress on degradation performance of biodegradable materials in water environment[J]. China Plastics (中国塑料), 2021, 35(7): 103-114.
[59] LIU Y K (刘云柯), ZHOU Y H (周云横), WEI Y H (卫亚红). Research progress on microbial degradation of PVA[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2018, 46(6): 124-128, 144.

（上接第 1185 页）

[89] BRAHIM A A, ERIYAGAMA Y, BAI B J, *et al.* Feasibility study of recrosslinkable preformed particle gels for natural gas injection profile control[J]. SPE Journal, 2022, 28(4): 1829-1841.
[90] ZHU D Y, HOU J R, CHEN Y G, *et al.* Evaluation of terpolymer-gel systems crosslinked by polyethylenimine for conformance improvement in high-temperature reservoirs[J]. SPE Journal, 2019, 24(4): 1726-1740.
[91] KIM J K, KIM S, JEONG Y R, *et al.* Self-healing strain-responsive electrochromic display based on a multiple crosslinked network hydrogel[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430(4): 132685.
[92] SCHUMAN T P, PU J Y, BAI B J. Systematic evaluation of a novel self-healing poly(acrylamide-*co*-vinyl acetate)/alginate polymer gel for fluid flow control in high temperature and high salinity reservoirs[J]. Polymer, 2021, 13(21): 3616.
[93] NARKAR A R, KENDRICK C, BELLUR C, *et al.* Rapidly responsive smart adhesive-coated micropillars utilizing catechol-boronate complexation chemistry[J]. Soft Matter, 2019, 15(27): 5474-7582.
[94] DENG G H, LI F Y, YU H X, *et al.* Dynamic hydrogels with an environmental adaptive self-healing ability and dual responsive sol-gel transitions[J]. ACS Macro Letters, 2012, 1(2): 275-279.