淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜的研究应用进展

董梦萱[1]，孟令伟[1,2*]，张丽媛[1,2]

（1.黑龙江八一农垦大学食品学院，黑龙江大庆 163319）

（2.黑龙江八一农垦大学黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室，黑龙江大庆 163319）

摘要：淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜具有较好的抗菌性和可生物降解性，是目前活性包装领域中的研究热点，但淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜存在机械性能不足、耐水性差、抗菌剂迁移、环境适应性差等问题，从而限制了其在食品和药品中的应用。该文介绍了淀粉类型和聚乙烯醇的改性对抗菌包装薄膜综合性能影响的研究进展；阐述了抗菌包装薄膜中抗菌活性成分的控释机理与方法，以及淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜在果蔬和肉制品贮藏保鲜中的应用情况。智能化活性包装材料有着广阔的发展前景，未来多功能复合抗菌包装材料的研究将有助于提升抗菌包装薄膜的指示性、稳定性以及缓释调控等性能，有利于包装行业的可持续发展，为绿色包装材料在食药领域中的应用提供新策略。

关键词：淀粉；聚乙烯醇；抗菌薄膜；控释机理

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0654

Progress in Research and Application of Antibacterial Packaging Film Based on Starch/Polyvinyl Alcohol

DONG Mengxuan[1], MENG Lingwei[1,2*], ZHANG Liyuan[1,2]

(1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2.Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: The antibacterial packaging film based on starch and polyvinyl alcohol has good antibacterial and biodegradable properties, and has become a current research hotspot in the field of active packaging. However, it has some problems such as insufficient mechanical properties, poor water resistance, migration of antibacterial agents, and poor environmental adaptability, which limit its application in food and medicine. The research progress on the influence of starch type and polyvinyl alcohol modification on the comprehensive performance of antibacterial packaging films were introduced, and the controlled release mechanism and methods of antibacterial active ingredients in antibacterial packaging films and the application of antibacterial packaging film based on starch and polyvinyl alcohol in the storage and preservation of fruits, vegetables, and meat products were elaborated in this article. Intelligent active packaging materials have broad development prospects. In the future, research on multifunctional composite antibacterial packaging materials will help improve the indicative, stable, and slow-release control properties of antibacterial packaging films, which are conducive to the sustainable development of the packaging industry and provide new strategies for the application of green packaging materials in the food and pharmaceutical fields.

Key words: starch; polyvinyl alcohol; antibacterial packaging film; controlled-release mechanism

随着时代的发展和科技的进步及人民生活水平的逐渐提高，塑料已经成为现代生活中不可或缺的一部分。从食品包装材料到随处可见的一次性塑料制品，塑料凭借诸多优异的性能，如较低的质量、低廉的生产成本以及耐用性，使得在全球范围大量生产和消费，推动包装等相关产业持续发展。目前全球每年塑料产出量已超过 4 亿吨，预测到 2050 年，塑料的累计产量将达到数万亿公吨[1]。根据欧洲生物塑料协会发布的报告，据统计 2023 年生产

收稿日期：2025-05-10；修回日期：2025-07-03；接受日期：2025-07-08

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD00902）；黑龙江八一农垦大学博士启动金项目（XDB202106）；黑龙江省重点研发计划项目（2022ZX02B18）；黑龙江省自然科学基金联合引导项目（LH2023B019）

作者简介：董梦萱（2002-），女，硕士研究生，研究方向：农产品加工与贮藏，食品活性与智能包装，E-mail：2787849471@qq.com

通讯作者：孟令伟（1979-），男，博士，副教授，研究方向：农产品加工与贮藏，食品活性与智能包装，E-mail：53223188@qq.com

的 218 万 t 生物塑料中，其中食品领域塑料包装占比 43%[2]。然而，其中仅有 10%的塑料能够得到回收再利用，大量剩余的塑料难以在自然环境中降解，导致陆地和海洋中的塑料不断堆积，对人类生存与健康构成了严重威胁[1]。绿色包装材料是指对人体健康无害，能够循环利用、可再生、材料废弃后对环境友好（如天然可降解材料能够在土壤中被完全降解）的包装材料[3]。利用新型可生物降解材料替代传统塑料，并将其用于食品保鲜领域，在食品包装行业中得到广泛关注。目前研究的热点主要集中在以脂质、多糖、蛋白质等生物基聚合物[4]为基材的可再生、可降解食品包装薄膜的开发，其中淀粉和聚乙烯醇是两种常见的成膜材料，已被广泛应用于绿色环保型可降解包装薄膜的研制[5]。

淀粉是自然界中含量最丰富的多糖之一，由直链淀粉（一种主要为线性葡聚糖）和支链淀粉（一种高分子量、高支链葡聚糖）组成[4]，因其优异的成膜特性、生物相容性和可再生性等性能，已被公认为是一种有前途的生物基可降解材料[6]。然而，淀粉固有的亲水性和脆性结构会限制淀粉基薄膜的机械性能和阻隔性，从而限制了其在食品包装领域中的应用范围[7]。通过对淀粉进行改性，包括物理改性、化学改性或生物酶改性，优化淀粉某些方面的性能，从而制备性能更优的淀粉基材料，以扩展其应用范围[8]。如对淀粉进行化学改性，将淀粉与聚乙烯醇混合制备机械性能较好的复合膜。Pan 等[9]通过对高直链淀粉进行化学改性制备羟丙基高直链淀粉，制备羟丙基高直链淀粉/聚乙烯醇复合膜，由羟丙基高直链淀粉制备的复合膜与其他淀粉复合膜相比具有更好的机械性能。

聚乙烯醇（Polyvinyl Alcohol，PVA）是一种合成的半结晶白色线性结构聚合物，其具有优异的物理性能、相容性、高乳化和粘合性能、耐化学性和生物降解性，被广泛应用于生产各类包装制品[10]。前人将 PVA 与淀粉共混，PVA 与淀粉分子链上的羟基结合形成氢键（图 1），制备出具有一定力学性能、透气性好、透光性强并可降解的薄膜材料[11]。

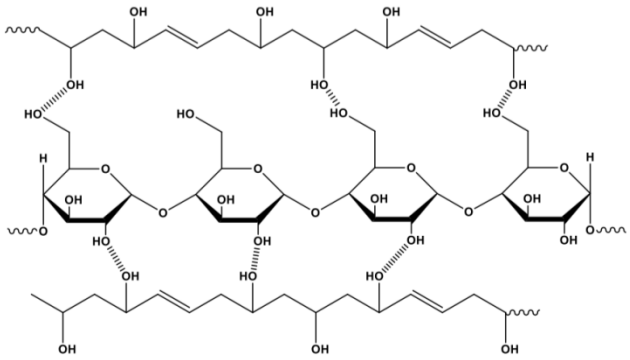

图 1 淀粉与 PVA 之间的化学反应

Fig.1 Chemical reaction between starch and PVA

以淀粉/聚乙烯醇为基材制备的抗菌包装薄膜兼具优良的抗菌性能和可生物降解性，然而，其机械性能不足、耐水性差、抗菌剂迁移、环境适应性差等问题也较为突出，从而限制了其在食品和药品中的应用。针对这些问题，国内外的专家学者做了大量的深入研究，该文从原料出发介绍了用于制备淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜的淀粉类型和聚乙烯醇的改性方法，阐述了抗菌包装薄膜中抗菌活性成分的控释机理与方法，以及淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜在果蔬和肉制品贮藏保鲜中的应用。这将为淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜的性能提升和产业化生产提供参考依据。

1 淀粉/聚乙烯醇复合薄膜的研究现状

1.1 淀粉类型对淀粉/聚乙烯醇复合薄膜性能的影响

淀粉是由糖苷键连接的葡萄糖单元长链组成的高分子聚合物，直链淀粉和支链淀粉这两类高分子多糖是淀粉的主要成分[12]。如表 1 所示，来源于不同植物的淀粉，其颗粒形态与大小存在较大的差异[13]。直链淀粉为线性聚合物，主要由 α-1,4 糖苷键连接而成，呈螺旋状，结构较为疏松，不易形成网络结构。支链淀粉分子量较大，主要由 α-1,4 糖苷键和 α-1,6 糖苷键组成，是高度分化的树状分子[14]。

表 1 不同种类淀粉颗粒形态与大小

Table 1 Morphology and size of different kinds of starch granules

淀粉种类	形态	直径/μm	晶型	参考文献
玉米淀粉	多角形或圆粒形	5~30	A 型	[15]
	圆盘状或透镜状	>9.9	A 型	
小麦淀粉	近球形	2.8~9.9	B 型	[16]
	不规则形	<2.8	C 型	
木薯淀粉	半球形或多面体	5~35	B 型	[17]
马铃薯淀粉	卵形或圆形	15~120	B 型	[18]
豌豆淀粉	椭圆形状	10~40	C 型	
绿豆淀粉	圆形、球形或肾型	3~35	C 型	[19]
燕麦淀粉	棱角型或椭圆形	3~10	A 型	[20]

在制备淀粉基薄膜时，淀粉颗粒和水在高温作用下淀粉分子间的氢键断裂形成糊化状态，冷却过程中淀粉老化；在淀粉老化过程中直链淀粉和支链淀粉会重新结合形成结晶，即淀粉回生。由于淀粉的回生特性和热塑性受淀粉成分内部结构中链长分布情况的影响，从而影响薄膜的机械性能以及水蒸气透过系数[21]。淀粉的来源不同，其直链淀粉含量也不同[13]，淀粉中不同直链淀粉含量对淀粉的糊化、老化以及回生特性有很大影响（表 2），大量研究表明直链淀粉含量较高的薄膜具有优异的成膜性能及机械性能[22,23]。凌建娣[24]以直链淀粉含量不同的普通玉米淀粉(直链淀粉含量 27wt.%)、高直链玉米淀粉 G50 和 G70（直链淀粉含量分别为 55wt.%和 68wt.%）为原料，制备淀粉/聚乙烯醇复合膜。研究结果表明，添加高直链淀粉 G50 和 G70 的复合膜断裂伸长率高于 100%，显著优于普通玉米淀粉/聚乙烯醇复合薄膜。

Pan 等[9]对不同直链淀粉含量的羟丙基淀粉/聚乙烯醇纳米纤维薄膜性能进行了比较，研究表明：直链淀粉含量高的羟丙基高直链淀粉制备的纤维与其他淀粉纤维相比具有更连续和均匀的形态。王明明等[25]制备了一系列不同淀粉含量以及直链与支链比例的淀粉基薄膜，发现随着支链淀粉比例的增加，薄膜拉伸强度、表面疏水性以及阻隔性能逐渐下降；随着直链淀粉比例的增加，薄膜的力学性能逐渐上升。尽管高直链淀粉原料的应用在一定程度上改善了淀粉基薄膜的机械性能，但薄膜仍然存在耐水性、熔融状态下流动性较差等问题[26]，针对淀粉基薄膜综合性能存在的问题，可通过在薄膜中加入 PVA、纳米颗粒等抗菌剂优化薄膜性能。

表 2 不同种类淀粉的直链淀粉含量

Table 2 Amylose content of different types of starch

淀粉种类	直链淀粉含量/(wt.%)	参考文献
玉米淀粉	22.25~28	[27]
高直链玉米淀粉	50~90	[28]
小麦淀粉	3.66~35.82	[29]
豌豆淀粉	37.2~40 低直链豌豆淀粉 52.7~61.5 中直链豌豆淀粉 73.9~77.6 高直链豌豆淀粉	[30]
紫薯淀粉	18.2~27.2	[31]
木薯淀粉	18.3~29	[32]
西米淀粉	24~31	[33]
大米淀粉	4.21~17.52	[34]

1.2 聚乙烯醇对淀粉/聚乙烯醇复合薄膜的影响

聚乙烯醇是一种由聚醋酸乙烯酯通过水解反应生成的一种多羟基高分子亲水性化合物，通常状态下呈白色颗粒状粉末。PVA 的合成主要通过乙烯醇单体的聚合反应或乙烯酸酯聚合物的醇解过程进行，据此 PVA 的聚合和醇解程度决定了其理化性质，特别是醇解程度[35]。淀粉/聚乙烯醇薄膜的机械性能、阻隔性能和耐水性能都比较差，这大大限制了其在食品包装中的应用，往往需要通过化学改性对其进行优化[36]。目前针对改善聚乙烯醇基薄膜耐

水性的改性方法包括化学交联、纳米补强和共混改性，主要总结为物理改性、化学改性和复合改性[35,37]，具体方法如表 3 所示。吕维思[38]制备聚乙烯醇/柠檬酸交联薄膜。研究表明交联薄膜与 PVA 薄膜拉伸强度相比提高了 14.99%，同时交联薄膜的水蒸气透过系数降低为 0.29 g mm/kPa m^2 h，吸水率降至 30.82%，交联剂的加入有效改善了 PVA 薄膜的耐水性。

添加增塑剂和交联剂对复合膜进行交联改性，增塑剂通常是小分子多元醇、无机盐等，增塑剂的加入可使淀粉或聚乙烯醇的羟基形成相互作用，破坏其分子间相互作用，降低结晶度[39]；使用甘油作为增塑剂，不同浓度的马来酸作为交联剂，制备玉米淀粉/聚乙烯醇共混膜，马来酸交联剂与淀粉/PVA 聚合物通过酯键的分子相互作用，交联薄膜的水蒸气透过系数最低达到 232.3±5.4 g/m^2 d，提高了薄膜的耐水性[40]。加入纳米填料对复合膜进行物理改性，以玉米淀粉作为纳米填料制备石墨烯量子点(Graphene Quantum Dots，GQDs)，GQDs 与淀粉/聚乙烯醇基质具有良好的相容性，复合膜的机械性能、耐水性和气体阻隔性得到明显改善，当 GQDs 质量浓度为 100 μg/mL 时，复合膜的综合性能最优[41]。经过改性的淀粉/PVA 基复合膜在综合性能上有了明显提升，但由于延长食品保质期主要是抑制致腐菌的生长，在淀粉/PVA 膜中加入抗菌活性物质使薄膜具有抗菌性。

表 3 PVA 的改性方法

Table 3 Modification method of PVA

	方法名称	具体方法
物理改性	共混改性	将 PVA 与多种不同的聚合物混合制备共混薄膜
	热处理改性	通过温度的改变，导致 PVA 分子结晶度改变，从而增强薄膜耐水性
	冻融循环法	通过冻融处理使 PVA 内部分子链紧密连接，产生微晶区
	极化作用法	通过改变 PVA 分子间的正负电荷分布，使分子链在薄膜中有序排列，提高薄膜的结晶度
化学改性	交联改性	通过加入交联剂，交联剂中的基团或官能团与 PVA 中的羟基发生化学反应，使 PVA 形成三维网络结构
	接枝改性	将某些具有特定功能的基团或聚合物支链,通过化学反应接枝到 PVA 分子链上改变 PVA 分子链的极性，改善薄膜性能
	复合改性	结合两种或两种以上方法对薄膜进行改性

2 抗菌活性成分的控释机理与方法

2.1 复合薄膜常用的抗菌活性成分类型

食品中致腐微生物的繁殖生长是食品腐败变质的主要原因之一，抗菌薄膜中的抗菌剂可以有效地减少致腐菌的繁殖生长，从而延长食品的货架期。抗菌剂的抗菌机制大致可分为两类：一类是通过破坏微生物细胞膜或壁的结构，另一类是改变细胞膜的通透性、运输能力及 pH 值[42]。由于抗菌剂具有特定的作用机制和生理特性，对病源微生物的作用方式存在差异，因此可根据微生物的细胞壁组成、生长条件是否需氧、最佳生长温度等条件，选择特定的抗菌剂[43]。目前抗菌剂主要分为有机、无机和天然抗菌剂。

2.1.1 有机抗菌剂

有机抗菌剂主要包括有机酸及其盐类、季铵盐类、双胍类等；其具有成本低、抗菌性能高、杀菌速度快等优异特性，但也存在耐热性差、毒性大、对微生物作用时间短等缺点。此类抗菌剂的主要作用机理是破坏微生物蛋白质和细胞膜的合成系统以及细菌的生物酶和代谢，从而达到杀菌的目的[44]。

2.1.1.1 有机酸及其盐类

有机酸能够作为食品包装中的抗菌剂取决于酸的分子结构、分子量、食品中微生物的性质及 pH 值等特性[42]。有机酸的抗菌机制是基于有机酸在溶液中存在解离和未解离的两种形式,这两种形式在溶液中处于动态平衡状态，单体形式的有机酸通过改变细胞膜的通透性，穿过细胞膜在细胞中解离产生质子，为了将细胞内的 pH 值保持在 7 左右，微生物的细胞将质子运出细胞膜，使得正在解离和未解离的有机酸的含量处于动态平衡状态，这一过程耗尽微生物细胞的能量导致细胞死亡[45]。山梨酸、柠檬酸、苹果酸、乳酸、乙酸、苯甲酸等弱有机酸是常见的抗菌剂。如乙酸、抗坏血酸、柠檬酸可替代亚硝酸盐等致癌食品添加剂用于鸡肉和牛肉的保鲜[46]。Das 等[47]将柠檬酸、酒石酸和苹果酸通过溶液流延法制备淀粉/聚乙烯醇复合薄膜，基于苹果酸的复合薄膜在机械强度（4.88±1.47 MPa）、抗菌性等方面均优于基于柠檬酸（5.14±0.63 MPa）的复合薄膜。

2.1.1.2 季铵盐化合物

季铵盐化合物是一类带正电荷的中心氨基，与烷基和芳香族取代基结合的广谱抗菌剂；抗菌机制与其化学结构密切有关，阳离子特性会影响带负电荷的细胞膜，使细胞膜内的物质流失导致细菌死亡[48]。季铵盐化合物的分类如表 4[49]所示，季铵盐化合物根据不同分类标准在抗菌性能方面有显著差异，单链季铵盐相较于双链季铵盐有较好的表面活性、润湿性和起泡性；同时单链季铵盐具有抗菌性、对皮肤无刺激，可应用于制备季铵盐表面活性剂、个人清洁护理产品。双链季铵盐有更强的抗菌和防腐性能，可作为抑菌剂用于纺织品中。含有芳香环的芳香季铵盐比非芳香季铵盐具有更高的抗菌性能、低毒性，同时芳香季铵盐应用于产品中可增强产品的香气。但相较于非芳香季铵盐，芳香季铵盐价格成本更高[49]。

由于良好的两亲性和抗菌性，季铵盐化合物在农业上作为杀菌剂、除草剂和灭藻剂，医护行业用于表面消毒、皮肤消毒以及漱口水使用，或用作食品保鲜中的抗菌剂[50]。研究表明大量使用季铵盐会对人体健康和生态环境存在潜在风险，根据欧盟对季铵盐化合物在食品中的含量检测表明季铵盐残留量一定范围内对人类食用和健康是安全[51]，因此应在确保人类健康的情况下，控制季铵盐作为食品抗菌剂或对食品生产线消毒灭菌的用量。

目前将季铵盐化合物作为抗菌剂应用于食品包装的主要研究包括：（a）通过季铵盐对壳聚糖进行改性，合成壳聚糖的季铵衍生物。Deng 等[52]合成了一种优良的季铵化壳聚糖为 2-羟丙基-三甲基氯化铵壳聚糖（2-Hydroxypropyl-Trimethylammonium Chloride Chitosan，HTCC），HTCC 和直链淀粉与戊二醛进行交联制备抗菌包装膜。研究表明与纯直链淀粉薄膜相比，HTCC/直链淀粉薄膜具有良好的抗菌性、机械强度、生物相容性并且增强了新鲜肉类的保鲜能力。（b）通过季铵盐对纳米纤维素进行改性，合成纳米级季铵化纤维素。Li 等[53]合成了一种新型的纳米级季铵化纤维素（Quaternary Ammonium Salt-Cellulose Nanofibers，CNF-QAS）与单宁酸-铁离子配位复合物（Tannic Acid-Iron Ion Coordination Complexes，TA-Fe）制备 PVA 抗菌薄膜，分别抑制了 99.8%和 99.7%的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长，抗菌薄膜可将橙子的保质期延长两周。

表 4 季铵盐化合物的分类

Table 4 Classification of quaternary ammonium compounds

分类依据	季铵盐化合物的分类
烷基链的长度	长链季铵盐（烷基链中碳原子数大于 8）
	短链季铵盐（烷基链中碳原子数小于 8）
烷基链的数目	单链季铵盐
	双链季铵盐
是否含有芳香环	芳香季铵盐
	非芳香季铵盐
带电性质	离子型季铵盐

2.1.1.3 双胍类抗菌剂

双胍类抗菌剂（如氨基胍衍生物、聚六亚甲基双胍等）的抗菌机制是通过其表面的正电荷与细菌中带负电荷的细胞膜或细胞壁中的磷脂相互作用，增加细胞膜的流动性、渗透性或破坏细胞壁的结构，细胞内部物质通过外膜流出，导致攻击病原体死亡[54]。

大部分双胍类抗菌剂能够促进伤口愈合，主要被应用于医疗领域，亦可将其应用于食品保鲜包装领域[55]，He 等[56]制备果胶/聚乙烯醇/聚氨丙基双胍薄膜，将薄膜应用到柑橘的保鲜中，有效抑制了意大利假单胞菌的生长。

2.1.2 无机抗菌剂

无机抗菌剂通常由金属，如银、镁、锌或其金属氧化物组成，主要包括金属离子和无机纳米材料，其中无机纳米材料的分类如表 5 所示[57]。

表 5 无机纳米材料的分类

Table 5 Classification of inorganic nanomaterials

无机纳米材料类型	纳米材料
金属与金属氧化物	银纳米粒子、纳米氧化锌
非金属	二氧化硅纳米粒子、氮化碳纳米材料
碳基	碳纳米管、碳点和石墨烯

无机抗菌剂的抗菌机制主要包括：（a）纳米颗粒与微生物直接接触，破坏细胞膜完整性，细胞中的营养物质流失。（b）金属氧化物在光照条件下产生活性氧，其在微生物细胞中产生反应，破坏细胞中的营养成分及遗传物质。（c）金属有机框架释放金属离子，金属离子与细菌细胞膜或酶相互作用，抑制细菌生长[58-60]。

纳米颗粒的大小、形态（片状、球型和棒状）、表面化学和环境等因素都会影响其在食品包装中的应用效果，与具有纳米微球的海藻酸盐薄膜相比具有一维纳米棒的薄膜有更好的机械性能和阻隔性能[61]。但同时棒状氧化锌（Zinc Oxide Nanoparticles，ZnO）纳米填料使淀粉/聚乙烯醇薄膜具有良好的透明度（约 90%）、紫外线屏蔽能力、机械性能和水蒸气阻隔性能，同时对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌表现出良好的抗菌活性[62]。

金属有机框架是一种具有高孔隙率、表面积大并且可根据不同食品包装材料特性进行调节的多孔材料。Khan 等[63]将钴离子和 2-甲基咪唑酸盐合成锌基咪唑框架（Zeolitic Imidazolate Framework-67，ZIF-67），将不同质量分数的 ZIF-67（2%、4%、6%、8%、10%）添加到淀粉/聚乙烯醇混合物中制备纳米复合薄膜，4 wt.%的 ZIF-67 赋予了淀粉/聚乙烯醇薄膜更好的机械强度（25 MPa）和热性能，以及可用于食品包装中的抗菌应用。

无机抗菌剂在众多抗菌材料领域中被广泛应用于制备抗菌薄膜，但其存在应用过程中工艺流程复杂、价格昂贵、不同的金属与基材的相容性不稳定等问题，同时金属基纳米材料具有不可降解性，这使得废弃后的金属基纳米材料会在环境中持续积累；纳米颗粒的毒性与颗粒大小呈反比关系，即纳米颗粒尺寸越小，其毒性越大。在食品包装应用中，纳米颗粒存在从包装迁移至食品中等问题，一旦进入人体，其微小的尺寸和较大的表面积，纳米颗粒能够绕过血管和细胞膜，最终给人类健康带来潜在威胁[42]。为改善纳米材料的安全性问题，可采取一系列措施。例如，通过改变环境因素（如酸性环境、光照）破坏金属基纳米颗粒的结构；调整薄膜的厚度、改变成膜基材等，以此控制纳米颗粒的迁移，进而降低纳米颗粒毒性对人体健康造成的风险[64]。

2.1.3 天然抗菌剂

天然抗菌剂具有较高的安全性，生物相容性较好、可再生、无污染等优点。如表 6 所示，根据来源不同对天然抗菌剂进行分类。

表 6 不同来源的天然抗菌剂

Table 6 Natural antibacterial agents from different sources

来源	具体物质
植物	果蔬中的酚类化合物，香料类的丁香、肉桂、大蒜
动物	高分子糖类中的壳聚糖，溶菌酶
微生物	细菌素，益生菌

2.1.3.1 酚类化合物

酚类化合物是植物中包含至少一个芳香环和一个或多个羟基的次生代谢产物，其数量丰富，广泛分布在蔬菜、水果、谷物、木材等植物材料中[65]。酚类化合物的抗菌性能受多酚浓度、种类和提取方法，环境温度，细菌种类的影响。关于酚类化合物的抗菌机制有许多假设，主要涉及破坏细菌细胞膜和细胞壁的完整性、抑制 DNA 合成、影响细胞内酶的活性、干扰自由基对活性氧的影响[66]。绿原酸是一种从金银花、苹果、马铃薯块茎和咖啡豆中提取的天然植物提取酚类化合物；其通过诱导细胞内碱性磷酸酶（Alkaline Phosphatase，AKP）泄露，增加细胞外 AKP 酶的活性，破坏细菌细胞壁完整性，从而对大肠杆菌表现出很强的抗菌活性[67]。Chen 等[68]通过加入绿原酸制备了一种新型淀粉/聚乙烯醇薄膜，研究表明薄膜具有优良的紫外线阻挡性能和抗菌性能（将大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的存活率分别降到 8.87%和 2.15%）。茶多酚是从茶叶中分离纯化的一种酚类化合物，具有广谱、强效的抗菌作用，对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均有显著的抑制作用[69]；Chen 等[70]制备了负载茶多酚的高直链玉米淀粉/聚乙烯醇基复合纳米纤维薄膜。研究表明，添加茶多酚为 15 wt.%时复合膜机械性能和水蒸气阻隔能力增强，同时复合膜提高了对金黄色葡萄球菌的抗菌活性。

2.1.3.2 精油

精油是一种由植物合成的次生代谢产物同时也是一种萜烯类化合物，来源于药用、香料（如丁香和肉桂）等植物的根、茎、叶、种子、果实、树皮各个部分，大量研究表明丁香、肉桂、百里香、牛至精油已经表现出较高的抗菌活性；精油的抗菌机制与其化学结构密切相关如化合物中的羟基破坏细胞质膜，导致细胞中的离子物质穿过膜结构，精油中的抗菌成分进入到细胞中，最终使细胞死亡[71]。由于精油是一种强挥发性化合物且易受温度和光照的影响，将其直接加入到薄膜基质中难以充分发挥其抗菌性能。皮克林（Pickering）乳液是一种固体聚合物

颗粒稳定的乳液，具有良好的稳定性、可生物降解性和生物相容性，对被包埋的精油有良好的保护作用，同时可以减缓精油的释放速率[5]。Zhao 等[72]用马铃薯淀粉和聚乙烯醇以及含有丁香精油（Clove Essential Oil，CLO）的皮克林乳液制备了抗菌薄膜，结果表明，抗菌薄膜具有优异的溶出稳定性、CLO 具有稳定的释放速率，可将猪肉的保存期延长至 10 天。

2.1.3.3 壳聚糖

壳聚糖是一种具有抗菌性的氨基多糖聚合物，来源于甲壳类（海洋、昆虫）动物的壳和微生物（酵母、黑曲霉等）细胞壁中甲壳素的衍生物[73]。壳聚糖对微生物的抗菌机制[74]：壳聚糖中的阳离子氨基与微生物带负电荷的细胞膜中脂多糖和磷壁酸作用，使细胞内成分流失导致细胞分解死亡；当 pH 值超出一定范围时，壳聚糖中的氨基会与金属阳离子产生螯合反应，导致微生物缺乏金属离子而死亡；一些低分子量的壳聚糖可以穿过微生物细胞的膜结构，抑制微生物中的遗传物质和营养物质的合成。壳聚糖的抗菌性与其分子量、环境、pH 值密切相关。单独应用壳聚糖制备的淀粉基薄膜具有较差的阻隔性能，可通过加入壳聚糖纳米颗粒增强薄膜的性能。Garavand 等[75]制备了三种不同配比（1、3、5 wt.%）的壳聚糖纳米颗粒（Chitosan Nanoparticles，CNP）/玉米淀粉/聚乙烯醇混合物的复合薄膜，与 1 wt.% CNP 相比，在复合膜中加入 5 wt.% CNP 对金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径显著提高了 45.9%同时机械性能显著提高了 25.5%。

2.1.3.4 细菌素

细菌素是由革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌核糖体产生的一种小分子抗菌肽，如乳酸链球菌素、纳他霉素、肠球菌素等。尽管目前应用到食品包装领域的细菌素较少，但细菌素中的乳酸链球菌素已经广泛的应用于水产品、乳制品和蔬菜的保鲜[76]。乳酸链球菌素是一种由乳酸乳球菌亚种菌株产生带正电荷的热稳定性抗菌肽，其抗菌机制概括为：与细菌细胞膜上的负电荷相互作用，破坏细菌细胞内的 pH 值平衡，从而改变细胞膜的通透性，导致细胞中的遗传物质流失[77]。乳酸链球菌素已被证明为有良好的食品安全性，并对大多数革兰氏阳性菌有较强的抑制作用，可用于制备食品包装薄膜及作为防腐剂直接加入到食品中。Berti 等[78]将不同比例乳酸链球菌素加入到木薯淀粉/玉米醇溶蛋白中制备可食用薄膜，研究表明抗菌薄膜减少了微生物的种群，可将奶酪的保质期延长 3 周左右。将乳酸链球菌素直接加入到果蔬中制备番茄酱，乳酸链球菌素的加入没有改变番茄酱的物理和化学特性，但会加速颜色的变化，产生消费者喜欢的红色[77]。

2.2 抗菌活性包装控释技术及机制

2.2.1 抗菌活性包装控释技术

2.2.1.1 抗菌活性包装技术

活性包装是一种为了延长食品保质期与食品、环境形成相互作用的包装系统，通过将抗菌活性物质以涂布的方式在包装表面形成抗菌包装，或者将其作为抗菌剂加入到生物聚合物制成的薄膜中[79,80]。将抗菌剂丁香精油（Clove Essential Oil，CLO）的皮克林乳液加入到马铃薯淀粉/聚乙烯醇基质中，制备具有优异的溶出稳定性同时 CLO 具有稳定释放速率的抗菌薄膜，可将猪肉的保存期延长至 10 天[72]。其作用机制可分为直接接触和间接接触，直接接触是指非挥发性活性物质通过包装直接扩散到食品表面，间接接触是指挥发性物质通过包装顶部扩散到食品[81]。

2.2.1.2 抗菌活性包装控释技术

活性包装控释技术主要分为共混、多层复合和封装技术[82,83]。

共混技术指的是通过改变复合膜中两种及两种以上聚合物的比例来提供活性包装抗菌物质的控制释放。石墨烯量子点（GQDs）加入淀粉/聚乙烯醇基质中制备淀粉基抗菌活性薄膜，研究表明当 GQDs 浓度从 50 μg/mL 增加至 150 μg/mL 时，活性薄膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制区直径分别显著增加了 51.1%和 42.6%[41]。

多层复合技术由三层组成，最里层为调节活性物质的释放，中间层有活性物质组成，最外层防止物质流失；挤出方式的制膜工艺可以更好的将活性物质固定在中间层表面。添加茶多酚为 15 wt.%时高直链玉米淀粉/聚乙烯醇基三元复合纳米纤维薄膜增强了薄膜的机械性能和水蒸气阻隔能力，提高了对金黄色葡萄球菌的抗菌活性，延长了草莓的货架期[70]。

封装技术是将活性物质通过微胶囊、负载多孔材料载体等技术封装在生物聚合物基质中。陈智杰[84]以 β-环糊精（Cyclodextrin，CD）及其羟丙基衍生物作为壁材包埋柠檬草精油（Lemongrass Oil，LMO）制备淀粉/聚乙烯

醇基抗菌活性薄膜，LMO 精油从薄膜中缓慢释放。在低温条件下，抗菌活性薄膜将大黄鱼的保质期延长至 15 天。

2.2.2 抗菌活性包装控释机制

活性物质控释方式主要分为诱导释放和扩散释放两大类，具体方式及机制[82,85,86]如表 7 所示。活性物质控释机制背后的物理化学原理主要包括 Fick 扩散定律、聚合物溶胀动力学、降解动力学等[87-89]。Chen 等[70]制备了负载茶多酚的高直链玉米淀粉/聚乙烯醇基复合纳米纤维薄膜实现了对茶多酚的受控持续释放，茶多酚在基于线性且可以优先定向成平行排列的聚集体的高直链玉米淀粉、具有可控的孔隙率和高表面积与体积比的纳米纤维膜中被递送缓慢释放并遵循 Fick 扩散定律。

表 7 活性物质的释放方式

Table 7 The release mode of active substances

释放方式	类型	机制	物理化学原理
诱导释放	溶胀诱导释放	淀粉基薄膜处于液体介质如水中时，淀粉聚合物发生溶胀，活性物质的扩散系数增加，导致活性物质释放	Fick 扩散定律、聚合物溶胀动力学
	生物可降解诱导释放	复合膜在降解过程中活性物质的迁移释放。诱导形式与活性物质含量相关:含量高时复合膜被整体降解，含量低时复合膜被部分降解	降解动力学、聚合物溶胀动力学
扩散释放	扩散受限释放	主要用于说明多层复合控释机制，活性物质由最内层逐步释放至食品表面	Fick 扩散定律
	扩散迂回释放	将纳米粒子加入到复合膜中，增加了活性物质释放时路径弯曲度，延长活性物质释放时间	Fick 扩散定律

3 淀粉/聚乙烯醇抗菌包装薄膜的应用

3.1 在果蔬中的保鲜应用

利用含有生物活性物质的淀粉/聚乙烯醇基抗菌薄膜包装果蔬，生物活性物质可以通过降低果蔬的呼吸强度及乙烯气体的产生从而延长其货架期，具体应用效果如表 8 所示。Liu 等[90]以火龙果为原料合成碳点纳米颗粒，将不同含量的碳点纳米颗粒加入到聚乙烯醇/玉米淀粉成膜基质中制备可生物降解薄膜。所制备的纳米复合薄膜有效地降低了香菇的呼吸强度和褐变。Guo 等[91]通过将光敏剂小檗碱和 L-精氨酸掺入淀粉/聚乙烯醇薄膜基质中，在光照条件下，小檗碱产生活性氧进一步触发 L-精氨酸释放一氧化氮（Nitric Oxide，NO），对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌超过 99%的抗菌性并且抑制了水果在储藏过程中乙烯的产生，有效延长草莓和香蕉的货架期。Riyajan 等[92]将不同比例的高岭土加入马来化木薯淀粉/聚乙烯醇基质中制备纳米复合薄膜，其有效延长了香蕉的货架期。

表 8 淀粉/聚乙烯醇抗菌包装薄膜在果蔬中的保鲜应用

Table 8 The preservation application of starch/polyvinyl alcohol antibacterial packaging film in fruits and vegetables

成膜基材	生物活性物质	食品	应用效果（贮藏温度/℃，保质期/天）	参考文献
玉米淀粉，PVA	绿原酸	草莓	25±1，7	[68]
	碳点纳米颗粒	香菇	25±2，7	[90]
	小柴碱，L-精氨酸	香蕉	室温，8	[91]
		草莓	室温，6	
马来化淀粉，PVA	高岭土	香蕉	29，7	[92]

3.2 在肉制品中的保鲜应用

肉制品在储存过程中极易受微生物的污染，将淀粉/聚乙烯醇基抗菌薄膜应用于肉制品包装可有效延长肉类货架期。Li 等[93]以辛烯基琥珀酸淀粉（Sodium Starch Octenyl Succinate，SSOS）、麦芽糖糊精和阿拉伯树胶为载体，负载草果精油（Amomum Tsao-Ko Essential Oil，AEO），制备了负载草果精油的以聚乙烯醇、玉米淀粉、变性淀粉为成膜基质的复合膜。AEO 精油对副溶血性弧菌、腐志贺氏菌、单核增生李斯特菌有良好的抗菌性，在低温条

件下，复合膜将金鲳鱼的保质期延长 4 天。

将对光照、pH 值等敏感的活性物质加入淀粉/聚乙烯醇基薄膜中制备智能活性薄膜，通过薄膜颜色的变化可以有效监测食品的新鲜度，具体应用效果如表 9 所示。Huang 等[94]制备了一种具有氨敏感和抗菌能力的纳米取代咪唑酸盐材料，将其加入玉米淀粉/聚乙烯醇基质中，可通过观察薄膜颜色的变化有效监测虾的新鲜程度。Xu 等[95]合成聚乙烯吡咯烷酮-茜素纳米颗粒和碳量子点，将其加入木薯淀粉/聚乙烯醇成膜基质中制备一种可监测食品新鲜度的薄膜。该薄膜可以在日光（橙黄至紫）和紫外光（红至蓝）下实现在不同温度 25、4 和-20 ℃条件下实时监测虾的新鲜度。Ding 等[96]合成了一种对 pH 值敏感的磷掺杂碳点，将其涂布在淀粉/聚乙烯醇薄膜上，根据猪肉中挥发性盐基氮含量的变化，薄膜的颜色可由棕黄色变为紫红色，将薄膜用于包装在 25 和 4 ℃条件下贮藏的猪肉，可有效监测猪肉的新鲜程度。

表 9 淀粉/聚乙烯醇基智能活性薄膜在肉制品中的保鲜应用

Table 9 The application of starch/polyvinyl alcohol-based intelligent active films in the preservation of meat products

成膜基材	生物活性物质	食品	贮藏温度/℃	薄膜颜色变化	参考文献
玉米淀粉，PVA	纳米取代咪唑酸盐材料	虾	25	由粉红色变为棕黄色	[94]
木薯淀粉，PVA	聚乙烯吡咯烷酮-茜素纳米颗粒和碳量子点	虾	25 4 -20	日光：由橘黄色变为紫色 紫外光：由红变为蓝色 无明显变化	[95]
	磷掺杂碳点	猪肉	25 4	由棕黄色变为紫红色	[96]

4 结论与展望

淀粉/聚乙烯醇基包装薄膜是典型的绿色环保型材料。通过优化淀粉类型，改性聚乙烯醇可有效改善材料的机械性能、耐水性能和气体阻隔性能。抗菌活性物质的添加能够赋予淀粉/聚乙烯醇基包装薄膜更强的抗菌保鲜作用。尽管淀粉/聚乙烯醇基包装薄膜在环保和抗菌方面具有显著潜力，但其在食品领域的应用仍面临一些挑战。耐水、耐候性以及活性物质的迁移是限制其广泛应用的关键因素，特别是抗菌性与力学性能、耐水性之间还存在矛盾，有机和无机抗菌剂与基材的相容性和迁移规律需要深入研究。未来可以通过交联改性、纳米复合、工艺优化等方法的协同优化进一步改善淀粉/聚乙烯醇基抗菌薄膜的机械性能、阻隔性能和环境适应性。通过调控抗菌剂的添加量、优化添加形式平衡材料的抗菌、力学和耐水性能，获得兼具高机械强度、高耐水性和抗菌功能的绿色环保型食品包装材料。另外，针对不同类型的抗菌活性物质，其成膜机制和缓释机理等问题还需要进一步探索。淀粉/聚乙烯醇基抗菌包装薄膜的性能优化能够扩大其应用领域，助力食品包装产业的可持续发展。

参考文献

[1] SUN S W. Enzyme-embedded biodegradable plastic for sustainable applications: advances, challenges, and perspectives [J]. ACS Applied Bio Materials, 2025, 8: 1785-1796.

[2] MEHRAN G, COLIN J B, BENU A. The future of bioplastics in food packaging: an industrial perspective [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2024, 43: 101279.

[3] LI R H, LI H J. The impact of food packaging design on users' perception of green awareness [J]. Sustainability, 2024, 18: 8205.

[4] PHIL R, CARMEN F A, PEDRO L G, et al. Design, new materials, and production challenges of bioplastics-based food packaging [J]. Materials, 2025, 18: 673.

[5] SHEN L, CHEN C W, XIE J. Development and characterization of starch/polyvinyl alcohol active films with slow-release property by utilizing mucorracemosus fresenius mycelium to load with clove essential oil [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 295: 139610.

[6] AREFIN K, HANIF M, MOHAMMAD A C, et al. Fabrication and characterization of corn starch based bioplastic for packaging applications [J]. Results in Materials, 2025, 25: 100662.

[7] LIU S, CHEN Y P,LI X K, et al. pH-responsive starch-based bilayer film functionalized with alliin loaded Mil-101 (Fe) for active food packaging [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 357: 123431.

[8] 李家栋.马铃薯淀粉/聚乙烯醇基复合薄膜的制备及机械性能研究[D].新乡:河南师范大学,2023.

[9] PAN W L, LIANG Q, GAO Q. Preparation of hydroxypropyl starch/polyvinyl alcohol composite nanofibers films and improvement of hydrophobic properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 223: 1297-1307.

[10] MOHAMMAD M D, LON S. Preparing and characterizing novel biodegradable starch/Pva-based films with nano-sized zinc-oxide particles for wound-dressing applications [J]. Applied Sciences., 2022, 12(8): 4001.

[11] 张昊.玉米淀粉/聚乙烯醇基薄膜的制备及性能研究[D].新乡:河南师范大学,2023.

[12] 林毅,朱品玲,严飞,等.改性淀粉基生物降解塑料包装的进展[J].塑料,2024,53(6):113-120.

[13] 许鑫,王斌,崔波.可生物降解改性淀粉基薄膜的特性及应用研究进展[J].食品工业科技,2023,44(15):474-481.

[14] 徐春梅,井丽敏,张斌,等.热塑性淀粉基薄膜研究进展[J].功能材料,2024,55(2):2115-2123.

[15] 蒲华寅,明欢育,张冲,等.超高压致淀粉结构变化对醋酸酯淀粉合成及产品品质的影响[J].食品科学,2024,45(21):254-260.

[16] 史盈盈,谈宇婷,张倩,等.小麦淀粉结构、特性及改性和应用研究进展[J].食品科技,2025,50(1):240-247.

[17] 李明娟,韦林艳,张雅媛,等.干燥技术对木薯酸淀粉品质特性及颗粒结构的影响[J].食品科学技术学报,2024,42(6):154-165.

[18] 孙莹.魔芋葡甘聚糖对三种晶型淀粉物理化学性质的影响[D].合肥:安徽农业大学,2020.

[19] 周淑蓝,叶发银,赵国华.绿豆淀粉的性质、改性及其应用[J].中国食品学报,2022,22(4):450-461.

[20] 王雅楠.疏水改性燕麦淀粉制备及其 Pickering 乳液乳化稳定性[J].食品研究与开发,2024,45(17):76-85.

[21] 迟敏,李利元,黄东杰.淀粉基食品薄膜在肉制品保鲜中的应用[J].食品安全质量检测学报,2023,14(12):117-125.

[22] 郭建荣,张书玉,贺军辉,等.基于生物质可降解薄膜的制备与应用[J].化学学报,2024,82(2):242-256.

[23] 张光,杨烨,马春敏,等.壳聚糖在淀粉基可食用膜中的应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2025,16(2):254-262.

[24] 凌建娣.直链淀粉含量对淀粉胶和淀粉/PVA 薄膜性能影响的研究[D].广州:广州大学,2023.

[25] 王明明,关二旗,李萌萌,等.淀粉含量和直链与支链比例对淀粉基可降解薄膜的性能影响及土壤降解研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2022,43(5):68-76+101.

[26] 王盛.聚乙烯醇/可溶性淀粉保鲜膜的制备及其性能研究[D].杭州:浙江农林大学,2023.

[27] ARUSHI A, DEEPAK B, ABHIGIT KUMAR D, et al. Development of high-amylose maize (*Zea mays* L.) genotypes adapted to Indian conditions through molecular breeding [J]. Crop and Pasture Science, 2024, 75(3): CP23343.

[28] MOHAMMED O, QI Y J, XU B. High-amylose maize starch: structure, properties, modifications and industrial applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120185.

[29] 李旭,王弘,王鼎,等.不同直链淀粉含量小麦淀粉理化性质与消化特性研究[J].麦类作物学报,2023,43(4):470-476.

[30] SUN G X, NI P J, EDMOND L, et al. Exploring the functional attributes and in vitro starch and protein digestibility of pea flours having a wide range of amylose content [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134938.

[31] 罗密,尹旺,郭崇韬,等.不同品种甘薯的淀粉结构与理化特性[J].贵州农业科学,2025,53(1):10-17.

[32] NATALIA R R, MASSAINE B E S, LUCIANA A D O, et al. Variability of amylose content and its correlation with the paste properties of cassava starch [J]. PLoS One, 2024, 19(10): e0309619.

[33] 杜春微.西米淀粉理化特性及其纳米颗粒的制备应用研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2021.

[34] XU H, XU S Q, XU Y, et al. Relationship between the physicochemical properties and amylose content of rice starch in rice varieties with the same genetic background [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 118: 103932.

[35] 张明玥.改性聚乙烯醇薄膜结构设计及其水分子阻隔性研究[D].淮南:安徽理工大学,2024.

[36] 廖海周.聚乙烯醇-乳清蛋白复合膜性质及其在圣女果保鲜中的应用[D].兰州:甘肃农业大学,2024.

[37] 孙艳美.改性聚乙烯醇薄膜的制备及在防水卷材中的应用研究[D].株洲:湖南工业大学,2024.

[38] 吕维思.交联改性聚乙烯醇复合材料的制备及性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.

[39] PHETDAPHAT B, APINYA S, KAEWTA K, et al. Modified cassava starch/poly(vinyl alcohol) blend films plasticized by glycerol: structure and properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 48848.

[40] RITESH K, KITAE P, KIHYEON A, et al. Maleic acid crosslinked starch/polyvinyl alcohol blend films with improved barrier properties for packaging applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271: 132495.

[41] SUN Q, ZHANG L, HUANG M Q, et al. Modification of starch-derived graphene quantum dots as multifunctional nanofillers to produce polymer starch/polyvinyl alcohol composite films for active packaging [J]. LWT, 2024, 198: 115953.

[42] IPSHETA B, SWARUP R, VINAY K P, et al. A comprehensive review on significance and advancements of antimicrobial agents in biodegradable food packaging [J]. Antibiotics (Basel, Switzerland), 2023, 12: 968.

[43] PUNITA U, MUHAMMAD Z, ROOPESH M S, et al. An overview of advanced antimicrobial food Packaging: emphasizing antimicrobial agents and polymer-based films [J]. Polymers, 2024, 16: 2007.

[44] 刘云春,朱平,张甜甜,等.抗菌性聚乳酸复合膜的制备和性能研究进展[J].塑料科技,2024,52(2):119-123.

[45] HUANG T Q, QIAN Y S,WEI J, et al. Polymeric antimicrobial food packaging and its applications [J]. Polymers, 2019, 11: 560.

[46] LOANNA M, MARIA D, ATHANASIOS A. The antimicrobial effect of thymol and carvacrol in combination with organic acids against foodborne pathogens in chicken and beef meat fillets [J]. Microorganisms, 2025, 13: 182.

[47] ARITRA D, MUKTASHREE S, MANISH K G, et al. Comparative efficacy of citric acid/tartaric acid/malic acid additive-based polyvinyl alcohol-starch composite films [J]. Journal of Materials Science: Materials in Engineering, 2024, 19: 9.

[48] ZHANG J X, CHENG L, LI H, et al. Challenges of quaternary ammonium antimicrobial agents: mechanisms, resistance, persistence and impacts on the microecology [J]. Science of The Total Environment, 2024, 958: 178020.

[49] 张雨航.新型壳聚糖季铵盐阳离子抗菌剂的合成制备及其性能研究[D].西安:西安工程大学,2023.

[50] 张利兰,覃存立,钱瑶,等.季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应[J].环境科学,2023,44(1):583-592.

[51] OSAMA E H, MAHMOUD H A, AHMED H H, et al. Monitoring and risk assessment for some quaternary ammonium compounds as antimicrobial agents in some processed and packaged food [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2025, 105: 3153-3170.

[52] DENG B, CHEN J W, LI S B, et al. An antibacterial packaging film based on amylose starch with quaternary ammonium salt chitosan and its application for meat preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129706.

[53] LI Z Q, QU J H,QIAN L W, et al. Multifunctional composite films based on polyvinyl alcohol, quaternary ammonium salt modified cellulose nanofibers and tannic acid-iron ion coordination complexes for food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126857.

[54] AQSA B, GUL A, ZOYA A, et al. Synthetic *vs.* natural antimicrobial agents for safer textiles: a comparative review [J]. RSC Advances, 2024, 14(42): 19.

[55] MASOUD G, SEYYED M D, HADI E G, et al. Injectable hydrogel incorporated with poly(hexamethylene biguanide) and deep eutectic solvent as linker and highly efficient antibacterial agents for bacteria-infected burnt wound [J]. Iranian Polymer Journal, 2024, 33: 419-434.

[56] HE M Y, PAN J P, HONG M, et al. Fabrication of antimicrobial packaging based on polyaminopropyl biguanide incorporated pectin/polyvinyl alcohol films for fruit preservation [J]. Food chemistry, 2024, 457: 140106.

[57] 闫晗.多功能金属有机框架复合材料的制备及其在食品包装中的应用[D].无锡:江南大学,2023.

[58] NILOUFAR R, ZAHRA G N, SHAHNAZ G, et al. Boosting antibacterial efficiency of gelatin/chitosan composite films through synergistic interaction of ag nanoparticles and Zif-8 metal-organic frameworks for food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 305: 141175.

[59] LI D, XUE R. Nanostructured materials for smart food packaging: integrating preservation and antimicrobial properties [J]. Alexandria Engineering Journal, 2025, 124: 446-461.

[60] SHUJAT A, ALI B, ALI H, et al. Optimized silver nanostructures for enhanced antibacterial potential: recent trends and challenges in the development of metallo-antimicrobials [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 507: 160470.

[61] ZHANG H L, WANG X L, LIU J Y, et al. Alginate composite films incorporated with Zn-based inorganic antimicrobials for food packaging: effects of morphology [J]. Journal of Food Science, 2024, 89: 5734-5747.

[62] HU W K, ZOU Z M, LI H P, et al. Fabrication of highly transparent and multifunctional polyvinyl alcohol/starch based nanocomposite films using zinc oxide nanoparticles as compatibilizers [J]. International journal of biological Macromolecules, 2022, 204: 284-292.

[63] NAVEED A K, MUHAMMAD B K N, FAROOQ F, et al. Metal organic frameworks derived sustainable polyvinyl alcohol/starch nanocomposite films as robust materials for packaging applications [J]. Polymers, 2021, 13: 2307.

[64] SAKSHI D, ASHA K, SHILPA K, et al. Advanced biodegradable starch-based nanocomposite films incorporating zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, and efficacy in antibacterial food packaging applications [J]. Journal of Environmental Chemical

Engineering, 2025, 13: 116296.

[65] CHEN X N, LAN W Q, XIE J. Natural phenolic compounds: antimicrobial properties, antimicrobial mechanisms, and potential utilization in the preservation of aquatic products [J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138198.

[66] BAI T, WANG X L, DU W Q, et al. Recent advances, challenges, and functional applications of natural phenolic compounds in the meat products industry [J]. Antioxidants, 2025, 14: 138.

[67] CHEN X, YI L K, BAI Y B, et al. Antibacterial activity and mechanism of stevia extract against antibiotic-resistant escherichia coli by interfering with the permeability of the cell wall and the membrane [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1397906.

[68] CHEN Y, ZHANG H F, WEI G S, et al. Active starch-based film using polyvinyl alcohol and chlorogenic acid for strawberry preservation: a comparative analysis of mechanical, barrier, and antibacterial properties [J]. Food Chemistry, 2025, 473: 143027.

[69] FATEMEH M, ELHAM M, MASOUD A M, et al. Enhanced antibacterial properties of polyvinyl alcohol/starch/chitosan films with NiO–CuO nanoparticles for food packaging [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 582108.

[70] CHEN L, WU F, XIANG M, et al. Encapsulation of tea polyphenols into high amylose corn starch composite nanofibrous film for active antimicrobial packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 245: 125245.

[71] ALEKSANDRA B, WIESLAW O. Essential oils as potential natural antioxidants, antimicrobial, and antifungal agents in active food packaging [J]. Antibiotics, 2024, 13: 1168.

[72] ZHAO Z H, LIN H L, TANG J Y, et al. Pork preservation by antimicrobial films based on potato starch (Ps) and polyvinyl alcohol (Pva) and incorporated with clove essential oil (Clo) Pickering emulsion [J]. Food Control, 2023, 154: 109988.

[73] MONA M, MOHAMMAD C, BABAK A, et al. Factors influencing the antimicrobial mechanism of chitosan action and its derivatives: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277: 134321.

[74] WU K J, YAN Z Y, WU Z Y, et al. Recent advances in the preparation, antibacterial mechanisms, and applications of chitosan [J]. Journal of Functional Biomaterials, 2024, 15: 318.

[75] YAHYA G, AMIN T G, FARHAD G, et al. Starch-polyvinyl alcohol-based films reinforced with chitosan nanoparticles: physical, mechanical, structural, thermal and antimicrobial propertiest [J]. Applied Sciences, 2022, 12: 1111.

[76] SRIDHAR A, MUTHUKUMAR J, THAMPI A, et al. Bacteriocins- convincible component of antimicrobial film for food packaging: a review [J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2023, 27: 142-150.

[77] ANA E C O, LUIS J C, ALEJANDRA L C, et al. Nisin as a food preservative: physicochemical, sensory properties and antimicrobial activity in mexican tomato sauce [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59: 3020-3030.

[78] S. B, L. M, R. J, et al. A ustainable and edible solution for cheese packaging: active films with natamycin and nisin [J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18: 6537-6549.

[79] LI J W, SUN H, WENG Y X. Natural extracts and their applications in polymer-based active packaging: a review [J]. Progress in Polymer Science, 2024, 16: 625.

[80] PATRICIA P, SANDRA F P, ANA G. Application of cinnamon essential oil in active food packaging: a review [J]. Progress in Polymer Science, 2024, 14: 6554.

[81] JESSICA R. W, MARTINE W. T, JIANG Y H, et al. Biodegradable active packaging with controlled release: principles, progress, and prospects [J]. ACS Food Science & Technology, 2022, 2: 1166-1183.

[82] KHADIJA F, PEI E T, KIT W C, et al. The future of food preservation: active packaging with controlled release systems [J]. E3S Web of Conferences, 2023, 428: 02009.

[83] 宁皓月.基于 IRMOF-3 的光响应控释活性包装膜的制备及性能研究[D].无锡:江南大学,2024.

[84] 陈智杰.包埋柠檬草精油的聚乙烯醇/淀粉活性抑菌抗氧化薄膜的制备及其在大黄鱼保鲜中的应用研究[D].上海:上海海洋大学,2021.

[85] 徐婧.紫外光响应控释抗氧化包装膜的制备及控释行为研究[D].无锡:江南大学,2023.

[86] 周小燕.负载茶多酚脂质体的壳聚糖/细菌纤维素缓释包装膜的构建与应用[D].无锡:江南大学,2023.

[87] 刘环,朱伟,侯豪,等.太湖底泥—水界面总溶解态磷的 Fick 扩散释放通量研究[J].湖泊科学,2024,36(6):1732-1742.

[88] 魏志毅,范海明,王杰祥,等.基于协同扩散模型的 PPGs 溶胀动力学[J].中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(6):165-173.

[89] 孙世东,孟凯丽,赵文红.淀粉基番茄红素复合物的酸碱稳定性及其降解动力学研究[J].包装与食品机械,2024,42(3):39-44.

[90] LIU Z B, CUI M, WENG R, et al. Incorporation of carbon dots into polyvinyl alcohol/corn starch based film and its application on shiitake mushroom preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135998.

[91] GUO H Q, SUN H Y, FANG Y, et al. Eco-friendly film with highly efficient sterilization for food preservation by incorporating natural products into starch/polyvinyl alcohol matrix [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 135047.

[92] SAAD R. Maleated cassava starch/poly (vinyl alcohol)/clay nanocomposite films for banana preservation: physical properties and application [J]. Polymer Bulletin, 2024, 81: 16539-16556.

[93] LI Y Y, HUANG X B, ZHAO X Q, et al. The refrigerated preservation effect of Amomum tsao-ko essential oil and its microcapsules loaded on polyvinyl alcohol/starch composite film based on broad-spectrum antibacterial properties on golden pompanos [J]. LWT, 2025, 222: 117595.

[94] 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: 128373.

[95] XU Y G, WANG K, LIU P, et al. A novel dual-channel cassava starch/polyvinyl alcohol-based film for visual monitoring of shrimp freshness [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 335: 122107.

[96] DING J, LIAO X F, LI W H, et al. Preparation of pH sensitive p-doped carbon dots-loaded starch/polyvinyl alcohol packaging film for real-time monitoring freshness of pork [J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104654.