

## 生物基可降解抑菌食品包装膜的研究进展

赵玉韩, 王涵, 张宇, 叶鹏浩, 刘晓青, 刘成珍

### Research Progress of Bio-based Biodegradable Antibacterial Food Packaging Films

ZHAO Yuhan, WANG Han, ZHANG Yu, YE Penghao, LIU Xiaoqing, and LIU Chengzhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040121>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 明胶基生物可降解薄膜的研究进展

Research Progress of Gelatin-based Biodegradable Films

食品工业科技. 2021, 42(11): 365-371 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060256>

#### 壳聚糖食品包装膜研究进展

Research Progress of Chitosan Food Packaging Film

食品工业科技. 2019, 40(6): 303-307,311 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.06.052>

#### 基于生鲜肉品和果蔬保鲜的生物可降解薄膜的研究进展

Research progress of biodegradable films based on preservation of fresh meat and garden stuff

食品工业科技. 2017(02): 390-395 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.067>

#### 壳聚糖/植物精油可食性抗菌膜研究进展

Research Progress of Edible Antimicrobial Films Based on Chitosan and Essential Oil

食品工业科技. 2018, 39(18): 323-329,335 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.18.057>

#### 可食性明胶复合膜及其在食品包装上的应用研究进展

Research progress of composite edible gelatin films and its application in food packaging

食品工业科技. 2017(20): 341-346 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.20.062>

#### 植物多酚-壳聚糖抑菌保鲜膜的研究进展

Research Progress of Plant Polyphenol-Chitosan Antibacterial Plastic Wrap

食品工业科技. 2021, 42(3): 326-331 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040321>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵玉韩, 王涵, 张宇, 等. 生物基可降解抑菌食品包装膜的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 362–371. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040121

ZHAO Yuhan, WANG Han, ZHANG Yu, et al. Research Progress of Bio-based Biodegradable Antibacterial Food Packaging Films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 362–371. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040121

· 专题综述 ·

# 生物基可降解抑菌食品包装膜的研究进展

赵玉韩, 王涵, 张宇, 叶鹏浩, 刘晓青, 刘成珍\*  
(青岛大学生命科学学院, 山东青岛 266071)

**摘要:** 食品包装作为食物抵御污染和微生物的第一层屏障, 是食品生产中不可或缺的一部分, 对食品安全、质量品质有着巨大影响。目前传统塑料包装的大量使用给生态环境带来了严重威胁, 与此同时, 由于微生物污染而导致的食源性中毒的案例层出不穷。在此背景下, 以天然生物材料为基质制备的可降解以及具有抑菌性能的复合薄膜, 在食品包装中有广阔的应用前景, 是未来食品包装材料发展的总趋势。本文从生物基膜材料(多糖类、蛋白质类、脂质)方面综述了可降解膜和抑菌膜的研究进展及其在食品中的应用, 并阐述了不同抑菌剂(合成抑菌剂、天然抑菌剂)在抑菌膜中的选用, 以及抑菌剂的添加对薄膜包装性能、抑菌性能等方面的影响。最后探讨了相关包装领域存在的不足, 并展望了可降解抑菌食品包装膜在未来应用的发展前景。

**关键词:** 可降解膜, 抑菌膜, 食品保鲜, 抑菌剂

中图分类号: TS206.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)06-0362-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040121



本文网刊:

## Research Progress of Bio-based Biodegradable Antibacterial Food Packaging Films

ZHAO Yuhan, WANG Han, ZHANG Yu, YE Penghao, LIU Xiaoqing, LIU Chengzhen\*

(College of Life Science, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** As the first barrier for food against pollution, food packaging plays a crucial role in food production, which greatly impacts both the quality and safety of food. Recently, the increasing use of conventional plastic packaging has posed a significant threat to the environment. Meanwhile, cases of foodborne poisoning caused by microbial contamination emerge endlessly. On this background, biodegradable antimicrobial film prepared with natural biological materials has a broad application in future food packaging materials. This article reviews the research progress of biodegradable and antimicrobial films based on biological materials (polysaccharides, proteins, and lipids) and their application in food packaging. And introduces the application of different antimicrobial agents (Synthetic and natural antimicrobial agents) in antimicrobial films. Moreover, discusses the effect of the addition of antibacterial agents on the properties of packing and the antibacterial activities of films. Finally, the shortcomings of food packaging-related fields are discussed. The development of biodegradable antimicrobial food packaging films in the future is prospected.

**Key words:** degradable film; bacteriostatic film; food preservation; antimicrobial agents

基于石化资源的传统塑料成形快、成本低、坚韧轻便, 在食品包装行业应用广泛。然而, 大量使用的塑料给生态环境带来了白色污染这一不可忽视的问题。目前全世界每年生产的塑料超过 3.5 亿吨, 预计

到 2050 年, 全球塑料累计产量达到 340 亿吨, 开发应用可降解型包装迫在眉睫<sup>[1]</sup>。除此之外, 普通塑料薄膜并没有抑菌功能。据统计, 约有 70% 的食源性疾病是由于食用被微生物污染的食物造成的, 针对微

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 山东省大学生创新创业计划训练项目 (202211065021)。

作者简介: 赵玉韩 (2002-), 男, 本科, 研究方向: 食品包装薄膜, E-mail: 3462287471@qq.com。

\* 通信作者: 刘成珍 (1991-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 活性成分稳态化, E-mail: liuchengzhen2014@163.com。

生物污染问题,直接从食品包装入手无疑是一种安全有效的解决方案<sup>[2]</sup>。综上所述,新型可降解抑菌薄膜的开发已成为了食品行业的研究热点之一。

生物基可降解类薄膜一般选用多糖、蛋白质以及脂质等天然生物材料作为膜基质,并且不同的膜基质还会赋予薄膜不同的性能,例如由具备抗菌能力的壳聚糖制备的薄膜,呈现出良好的防腐性能<sup>[3]</sup>。但与传统聚乙烯塑料薄膜相比,以天然生物基材料制备的薄膜往往在阻隔、机械性能等方面存在一定的不足,需要选用合适的改良剂,利用其与生物基材料的相互作用改良薄膜的各项性能<sup>[4]</sup>。当这些改良剂同时具有抑菌能力时,所制备出的薄膜往往也具有一定的抑菌效果。根据加入薄膜中的抑菌剂(改良剂)的来源可将其分为合成抑菌剂以及天然抑菌剂,后者又可以进一步分为植物、动物以及微生物来源类<sup>[5]</sup>。而不同抑菌剂的性质、抑菌能力不同,其对于薄膜的影响也各不相同。本文以生物基可降解薄膜的膜基质为切入点,首先介绍了相关薄膜与改良剂选用的相互影响及研究进展,并列举了薄膜在实际食品包装中的应用。随后根据来源分别介绍了不同抑菌剂(改良剂)的特性,重点分析了抑菌膜的抑菌性能以及膜基质和抑菌剂相互作用带来的性能提升,最后探讨了生物基可降解抑菌膜目前存在的挑战与发展趋势,可以为相关领域的研究提供一定的借鉴和启示。

## 1 可降解膜基质

### 1.1 多糖基质

多糖是自然界中存在最多的大分子材料,原料廉价易得,且多糖本身可作为多种活性物质的良好载体,是目前开发最广泛的可降解薄膜基质<sup>[6]</sup>。然而,多糖类膜材料在实际应用中也存在一定的缺陷,包括:由多糖制成的薄膜在拉伸强度、韧性以及阻隔性等方面大多不如普通塑料薄膜;多糖类本身含有较多的羟基、羧基等亲水性基团,导致其疏水性能差、易受潮;部分多糖,如淀粉本身就可以作为微生物的碳源,不利于食品保藏<sup>[5]</sup>。因此,研究人员开发了多种方式改善多糖基膜的性能,主要是选用不同的改良剂或与其他基质复合,如表 1 所示。

**1.1.1 淀粉** 淀粉成本廉价、来源广泛,是一类常见的可再生天然高分子材料。淀粉属于高分子碳水化合物,基本构成单位是  $\alpha$ -D-吡喃葡萄糖。淀粉的成膜性能主要取决于直链淀粉与支链淀粉的比例,且支链淀粉越多薄膜亲水性越强,影响了淀粉基薄膜的进一步开发利用。Pérez-vergara 等<sup>[7]</sup>向淀粉中添加蜂胶制备薄膜,利用蜂胶的疏水特性显著降低了薄膜的水分含量和水蒸气透过率。该研究表明通过向淀粉基薄膜中添加疏水性物质可以有效改良其亲水性强的缺点,而除了添加改良剂,将淀粉与其他基质复合,利用物质之间范德华力、氢键等相互作用力同样可以改善淀粉膜的性能。Fakhouri<sup>[8]</sup>研究发现明胶的加入显著提高了淀粉膜的机械强度,且复合膜对冷藏

表 1 多糖基质与改良剂选用及其在食品中的应用  
Table 1 Selection and their application of polysaccharide substrates and modifier in food industry

基质种类	改良剂	食品中的应用
淀粉	蜂胶 <sup>[7]</sup> 明胶 <sup>[8]</sup> 槲皮素与叔丁基对苯二酚 <sup>[9]</sup>	葡萄 <sup>[8]</sup> 猪油与鲜猪肉 <sup>[9]</sup>
果胶	茶多酚 <sup>[10]</sup> 海藻酸钠 <sup>[11-12]</sup>	蓝莓 <sup>[13]</sup>
纤维素	小檗碱-黄芩苷纳米颗粒 <sup>[14]</sup> 菊粉和益生菌 <sup>[15]</sup> 辣木植物提取物 <sup>[16]</sup>	鸡柳 <sup>[15]</sup> 鳄梨 <sup>[16]</sup>
黄原胶	氧化锌纳米颗粒 <sup>[17]</sup> 羧甲基纤维素 <sup>[18]</sup> 果胶与海藻酸钠 <sup>[19]</sup>	马铃薯 <sup>[19]</sup>
魔芋葡甘露聚糖	壳聚糖-没食子酸纳米颗粒 <sup>[20]</sup> 浓缩乳清蛋白与蜂蜡 <sup>[21]</sup> 普鲁兰多糖 <sup>[22]</sup>	草莓 <sup>[22]</sup>
海藻酸钠	茶多酚 <sup>[25]</sup> 五倍子提取物 <sup>[26]</sup> 噬菌体 <sup>[27]</sup> 绿色蜂胶提取物 <sup>[28]</sup>	冷藏鸡胸肉片 <sup>[27]</sup> 冷藏鱼肉片 <sup>[28]</sup>
壳聚糖	纤维素 <sup>[30]</sup> 海桑叶提取物 <sup>[31]</sup> 乳酸链球菌素与丁香精油 <sup>[32]</sup> 菊花精油 <sup>[33]</sup>	猪肉 <sup>[32]</sup> 牛肉 <sup>[33]</sup>

葡萄的保鲜有良好效果。然而,单一薄膜对食品的保藏效果有限,一般只能起到阻隔空气和污染的作用。Tongdeesoontorn 等<sup>[9]</sup>将槲皮素与叔丁基对苯二酚作为改良剂加入至淀粉、明胶复合膜中,不仅提高了复合膜的拉伸强度,还提高了薄膜的抗氧化能力,在食品应用方面,复合膜包覆的猪油 15 d 内过氧化值没有明显变化,同时也显著减缓了实验组猪肉的红度下降。由此可知,当改良剂具有特殊功能性质,如抗氧化性时,可以进一步提高淀粉基薄膜的应用价值。

**1.1.2 果胶** 果胶是一类广泛存在于植物中的多糖类高分子化合物,主要从柑橘、柠檬、苹果等植物的叶、皮、茎、果实中提取。通过与二价阳离子交联而制备的单一果胶薄膜内部结构较松散,易结合活性物质,但这种特性也给薄膜的机械和阻隔性能带来了不良影响。Lei 等<sup>[10]</sup>向果胶中加入茶多酚作为改良剂,通过其与果胶的交联增加了薄膜的机械性能,并利用茶多酚的抗氧化性降低了薄膜的氧气透过率,但过量的茶多酚会发生聚集,对薄膜性能产生不利影响。作为多酚类物质,茶多酚与果胶之间可以形成氢键,这也是薄膜机械性能提高的原因,说明添加改良剂时必须考虑其与果胶之间的相互作用。除了改良剂,在选择与果胶复合的基质时同样需要考虑两者之间的相容性。Galus 等<sup>[11]</sup>在果胶膜中加入海藻酸钠制备复合膜,研究发现海藻酸钠的浓度比例越高,复合膜的水蒸气透过率和厚度越小,而力学性能呈先增后减的趋势,当海藻酸钠:果胶=1:1 时薄膜具有最佳力学性能。与之类似,Mannozi 等<sup>[12]</sup>同样制备了海藻酸钠与果胶复合的薄膜,并将其用于冷藏条件下蓝莓的保鲜,实验发现复合膜可以有效保持蓝莓的质构与硬度,有利于延长其货架期。上述研究表明果胶与海藻酸钠之间具有良好的协同作用,同时海藻酸钠还可以

改善果胶的凝胶特性,提高果胶膜的包装性能,这对果蔬加工副产物的综合利用具有重要意义。

**1.1.3 纤维素** 纤维素是自然界中分布最广、含量最多的一种多糖,是植物细胞壁的主要成分,将纤维素羧甲基化后可制备羧甲基纤维素,是可降解薄膜制备中应用最广泛的多糖之一。但单一羧甲基纤维素制成的薄膜在疏水及机械性能上有一定的不足,选择合适的改良剂可以改善这一问题。Li等<sup>[14]</sup>通过将小檗碱—黄芩苷纳米颗粒加入到由羧甲基纤维素钠、卡拉胶制成的复合膜基质中,实验发现添加纳米颗粒后,复合膜的力学性能、疏水性能和热稳定性均得到了改善。改良剂除了与纤维素基质相互作用以提高薄膜包装性能外,还可以赋予薄膜一些特殊功能。如 Zabihollahi等<sup>[15]</sup>在羧甲基纤维素中加入了菊粉和益生菌,其中菊粉的加入增加了膜中益生菌的活力,制成的薄膜更有助于延长鸡柳的货架期。同样在食品保鲜方面, Tesfay等<sup>[16]</sup>将具有较强抗真菌活性的辣木植物提取物加入至羧甲基纤维素中制备薄膜,在经过低温冷藏 21 d 后,实验组鳄梨的腐败率、失重率、乙烯释放量和呼吸强度均低于对照组。由此可知,功能性改良剂的添加还可以提高纤维素薄膜的应用价值,为羧甲基纤维素薄膜的进一步开发提供了一定依据。

**1.1.4 黄原胶** 黄原胶是一种由野油菜黄单胞菌产生的水溶性微生物胞外多糖,由 D-葡萄糖、D-甘露糖和 D-葡萄糖醛酸按 2:2:1 组成,是世界上生产规模最大的微生物多糖<sup>[13]</sup>。黄原胶具有良好的水溶性、热稳定性和增稠性,同时它与其他多糖也具有较好的相容性。刘义武等<sup>[17]</sup>利用黄原胶和果胶制备复合薄膜,红外光谱实验证明两者可以通过氢键、静电引力和范德华引力等产生较强的相互作用,且黄原胶的添加可以显著提高复合膜的结晶度和拉伸强度。然而,黄原胶本身含有较多的亲水基团,良好的水溶性反而限制了其在可降解膜中的应用。如 Zheng等<sup>[18]</sup>研究发现在羟丙基甲基纤维素、黄原胶薄膜中,黄原胶浓度上升会提高薄膜的水蒸气透过率,推测与黄原胶在高湿度环境下溶胀有关。基于此, Fan等<sup>[19]</sup>制备了果胶、黄原胶、海藻酸钠的复合膜,通过响应面法确定了三者的最佳比例为果胶:海藻酸钠:黄原胶=6:5:4,同时实验证明复合膜显著降低了马铃薯冷藏过程中的失重率,并通过抑制马铃薯中多酚氧化酶的活性来延缓鲜切马铃薯褐变。上述研究表明,与其他基质复合可以改善黄原胶本身水溶性强的缺点,扩大它的应用范围,但需要选择合适的添加比例。

**1.1.5 魔芋葡甘露聚糖** 魔芋葡甘露聚糖主要由魔芋的块茎制得,是由 D-吡喃葡萄糖和 D-吡喃甘露糖以  $\beta$ -1,4 糖苷键连接形成的杂多糖,拥有极强的粘度和持水性,可以通过碱化处理等方式形成热稳定凝胶。Wu等<sup>[20]</sup>以壳聚糖和没食子酸合成出纳米颗粒,将其作为改良剂加入魔芋葡甘露聚糖薄膜中,实

验发现纳米颗粒可以改善薄膜力学性能,但过高浓度的纳米颗粒加入使得薄膜变得过于致密,导致拉伸应变下降了约 36%。与合成纳米颗粒不同,天然物质与魔芋葡甘露聚糖往往有更好的相容性。安瑞琪等<sup>[21]</sup>在魔芋葡甘露聚糖溶液中加入浓缩乳清蛋白和蜂蜡制备薄膜,随着二者浓度提高,薄膜的力学性能和疏水性能均得到了改善,但蜂蜡的加入会导致复合膜厚度显著增加。除此之外,魔芋葡甘露聚糖与其他基质复合同样可以提高薄膜的相关性能。Yan等<sup>[22]</sup>将魔芋葡甘露聚糖和普鲁兰多糖复合,实验发现复合膜的机械性能和阻隔性能与单一基质相比显著提高,而在食品保鲜应用中,复合膜能有效降低草莓的失重率,并保持草莓的可滴定酸度、可溶性固形物和果皮颜色,从而提高草莓的贮藏品质。由上述研究可知,魔芋葡甘露聚糖不仅具有良好的凝胶特性,同时与其他基质的复合以及添加改良剂可更进一步改善其成膜特性,在可降解食品包装膜开发中具有广阔的前景。

**1.1.6 海藻酸钠** 海藻酸钠是从褐藻类的海带或马尾藻中提取碘和甘露醇之后的副产物,具有良好的成膜性能,且由其衍生出的海藻纤维和海藻低聚糖均具备优良的抑菌效果<sup>[23-24]</sup>。但由于海藻酸钠本身含有大量的  $-\text{COO}^-$ ,由其制成的薄膜往往亲水性较强。Dou等<sup>[25]</sup>通过将具有疏水性能的多酚化合物—茶多酚加入到了海藻酸钠、明胶复合膜中,有效降低了复合膜的水蒸气透过率,提高了表面水接触角。与之类似, Aloui等<sup>[26]</sup>将五倍子提取物加入海藻酸钠薄膜中,实验发现随着五倍子提取物浓度提高,薄膜拉伸应力和应变均得到了改善,水蒸气透过率也逐渐下降。除了天然活性物质,某些病毒同样可以作为海藻酸钠薄膜的功能性改良剂,使海藻酸钠薄膜具备较强的抑菌性能。Alves等<sup>[27]</sup>将噬菌体装载在海藻酸钠膜上以提高其保鲜性能,实验证明加入了噬菌体的薄膜可显著抑制人工接种了荧光假单胞菌的鸡胸肉片腐败。同样也是用于冷藏肉类保鲜, Cruz等<sup>[28]</sup>将绿色蜂胶提取物添加到海藻酸钠中,保鲜实验证明薄膜可将冷藏鱼肉片的保质期从 4 d 延长至 15 d,显著降低了冷藏鱼肉片的水分损失和总挥发性盐基氮的含量。然而上述研究中茶多酚、五倍子提取物等改良剂通常具有易氧化变色的特性,当其加入薄膜中的浓度过高后往往会引起膜颜色的不良改变,或许会使消费者联想到污染、变质、肮脏等,进而可能影响到食品销售。

**1.1.7 壳聚糖** 壳聚糖是甲壳素 N-脱乙酰基的产物,在  $\text{C}_2$  位上被一个乙酰氨基和氨基所代替,是天然多糖中唯一的碱性多糖,有良好的可降解性和成膜性能,同时其本身就具有较好的抑菌性能<sup>[29]</sup>。但以单一壳聚糖制成的薄膜不耐拉伸,柔韧性差,可以通过与其他天然基质复合改善其机械或阻隔性能。Yang等<sup>[30]</sup>将壳聚糖与纤维素复合,研究发现随着复合膜中壳聚糖浓度的提高,薄膜拉伸应变逐步提高,推测

是壳聚糖与纤维素直接形成氢键所致,但当壳聚糖含量过高,即纤维素:壳聚糖=7:3时,拉伸应力会急剧下降。在壳聚糖中添加改良剂同样可以进一步提升薄膜的阻隔和机械性能。Nguyen等<sup>[31]</sup>将海桑叶提取物加入壳聚糖薄膜基质中,实验发现随着提取物浓度上升,薄膜的亲水性和溶胀率大幅下降,同时薄膜对铜绿假单胞菌抑制效果强于金黄色葡萄球菌,但当提取物浓度较高时,膜的抑菌效果反而会下降,推测和膜中氢键网络密度增加,阻碍了提取物的释放有关。除此之外,在食品应用方面 Venkatachalam等<sup>[32]</sup>以乳酸链球菌素、丁香精油提高了单一壳聚糖薄膜的抑菌保鲜性能,实验证明复合薄膜可以将新鲜猪肉冷藏保存时间延长了3~6d。与之类似,Lin等<sup>[33]</sup>将菊花精油添加进了壳聚糖中,提高了壳聚糖薄膜对牛肉中单核增生李斯特菌的抑制能力,且菊花精油的添加还使得牛肉中硫代巴比妥酸反应物含量显著下降,同样延长了牛肉货架期。上述研究表明,一些具有抑菌性能的改良剂不仅可以提高壳聚糖薄膜机械、阻隔性能,还能增强壳聚糖薄膜本身的抑菌能力,从而进一步提高其对食品的防腐保鲜效果。

## 1.2 蛋白质基质

可降解蛋白薄膜是在天然蛋白中添加增塑剂、交联剂等,借助不同分子间的相互作用形成的薄膜。常见的可用于制备薄膜的蛋白质有植物来源的大豆分离蛋白等以及动物来源的明胶、酪蛋白等<sup>[34]</sup>,如表2所示。此外,蛋白质基质也常与糖类、脂质复合,以提高薄膜的各项性能。有研究表明加入羟甲基纤维素可以提高蛋白基薄膜的热稳定性,加入酒石酸可以使薄膜更加光滑,而加入苹果果胶则降低了薄膜的水蒸气和紫外线透过率<sup>[35]</sup>。

表2 蛋白质基质与改良剂的选用及其在食品中的应用  
Table 2 Selection of protein substrates and modifier and their application in food industry

基质种类	改良剂	食品中的应用
大豆分离蛋白	纳米纤维素晶须 <sup>[36]</sup> 壳聚糖和硬脂酸 <sup>[37]</sup> 百里香酚与硅藻土复合物 <sup>[38]</sup>	苹果 <sup>[37]</sup> 蓝莓 <sup>[38]</sup>
明胶	二氧化钛与葡萄柚籽提取物 <sup>[40]</sup> 羟基酪醇和3,4-二羟基苯基乙二醇 <sup>[41]</sup> 马齿苋提取物 <sup>[42]</sup>	冷藏生牛肉 <sup>[41]</sup> 鱼香肠 <sup>[42]</sup>
酪蛋白	甘油 <sup>[44]</sup> 紫胶与丁香酚 <sup>[45]</sup>	年糕 <sup>[45]</sup>

1.2.1 大豆分离蛋白 大豆分离蛋白是一种具有高营养价值的食品添加剂,也可用于制备可降解薄膜。单一的大豆分离蛋白薄膜柔韧透明,在低相对湿度下对氧气具有很高的阻隔性,但疏水性和力学性能较差,限制了大豆分离蛋白基薄膜食品包装中的应用。Zhao等<sup>[36]</sup>利用天然纤维素降解得到纳米纤维素晶须,并将其加入大豆分离蛋白中制备薄膜,实验表明纳米纤维素晶须的加入显著提高薄膜拉伸应力的同时也会降低其断裂伸长率,同时薄膜的水蒸气透过性

能也得到了改善。但纳米纤维素晶须添加量过高后会在基质中聚集,降低薄膜的阻隔和力学性能。除了选择合适的改良剂,还可以通过琥珀酰化、棕榈酰化等处理大豆分离蛋白本身使其改性,破坏球状蛋白分子,使得肽链延伸,从而提高薄膜的各项性质。Wu等<sup>[37]</sup>研究证明琥珀酰化在改善大豆分离蛋白成膜性能上优于棕榈酰化,并将壳聚糖和硬脂酸作为改良剂加入琥珀酰化大豆分离蛋白中,以制备出薄膜应用于苹果保鲜,发现处理后的苹果呼吸跃变峰比对照组出现延迟了一周,且各项生理指标也优于对照组。同样在食品应用方面,Lu等<sup>[38]</sup>将百里香酚和硅藻土的复合物加入至大豆分离蛋白膜中,薄膜在5d内可以显著延迟常温下蓝莓的失重和硬度下降,推测与百里香酚的加入抑制了细菌对蓝莓表皮纤维素的分解有关。大豆分离蛋白本身来源丰富,质优价廉,而蛋白改性技术、改良剂(抗氧化剂、抑菌剂)的添加更进一步完善了其疏水性和机械性能的不足,故其在未来可降解薄膜开发中具有较大的应用潜力。

1.2.2 明胶 明胶是一种大分子的亲水胶体,是胶原部分水解后的产物,具有良好的成膜性能。明胶中含有大量的羟基、羧基等亲水性基团,导致其极易吸水并膨胀软化,同时其本身也可以作为许多微生物的碳源,在潮湿环境中易导致微生物滋生<sup>[39]</sup>。基于此,Riahi等<sup>[40]</sup>通过在明胶膜中加入二氧化钛可显著提高薄膜疏水性能,并进一步添加葡萄柚籽提取物提高了薄膜的抗氧化能力,且使薄膜具备了较强抗菌能力,但二氧化钛加入的同时会导致薄膜表面粗糙度提高。而在应用于食品保鲜的明胶膜研究中,往往利用抗氧化剂作为膜的改良剂,从而赋予薄膜一定的抗氧化能力。Bermúdez-Oria等<sup>[41]</sup>将羟基酪醇和3,4-二羟基苯基乙二醇加入至果胶、明胶复合膜中,显著抑制了冷藏生牛肉中硫代巴比妥酸反应物质形式的氧化产物形成。与之类似,Dehghan等<sup>[42]</sup>将马齿苋提取物加入至明胶并用于鱼香肠保鲜中,不仅抑制了鱼香肠中嗜冷菌和霉菌的生长,而且同样降低了硫代巴比妥酸反应产物的生成,减少了鱼香肠样品在储藏30d后的粗蛋白和水分的损失。明胶薄膜高亲水性以及在湿润环境中可以引起微生物滋生的特性是限制其应用的主要因素,上述研究表明通过添加具有疏水性、抑菌性、抗氧化性的改良剂可以提高明胶薄膜的应用特性。

1.2.3 酪蛋白 酪蛋白是乳中含量最高的蛋白质,具有较高的营养价值和乳化能力,它可以与金属离子形成可溶性复合物,号称“矿物质载体”。在酪蛋白基薄膜中,极性氨基酸的链状分布导致其对非极性分子具有良好的阻隔性,然而酪蛋白中的极性氨基酸和非极性氨基酸之间的相互作用会产生粘性基质,这种基质在干燥过程中极易收缩脆化<sup>[43]</sup>。Montes-De-Oca-Avalos等<sup>[44]</sup>研究证明甘油可以渗透入蛋白分子间,通过破坏其相互作用力从而使薄膜更加柔软,更易从

制备平板上剥离,降低粘性基质收缩造成的薄膜脆性。除了甘油以外,酪蛋白交联剂的添加同样可以改善其成膜特性。Wang等<sup>[45]</sup>利用紫胶与酪蛋白间的极性和疏水相互作用作为酪蛋白交联剂,提高了酪蛋白基薄膜的韧度和断裂伸长率,同时加入丁香酚以增加膜的抗菌性能和抗氧化性能,以年糕为对象,研究发现复合膜可以显著延缓年糕霉变,并且在3 d内保持年糕的黏性、结构和回弹性不变。由于酪蛋白本身提取成本较高,因此可以通过加入低成本的交联剂来降低薄膜中酪蛋白相对含量,同时改善薄膜包装性能,上述研究对此有一定的参考意义。

### 1.3 脂质

脂质对水分具有良好的阻隔性能,在食品包装领域的开发中,脂质既可以作为涂膜剂,又能作为改良剂使用,如表3所示。而在这其中,蜡类涂膜剂应用最广,且同样可以通过选择合适的改良剂来提高保鲜性能。Motamedi等<sup>[46]</sup>通过纳米黏土改良巴西棕榈蜡,并将其用于橙子保鲜中,结果表明无论从失重率、可溶性固形物、可滴定酸度等物理指标还是从感官评价上,改良后的巴西棕榈蜡涂层均优于两种常见的商品蜡涂层。

表3 脂质基质与改良剂的选用及其在食品中的应用  
Table 3 Selection of lipid substrates and modifier and their application in food industry

类别	基质/改良剂种类	应用于食品
蜡类涂膜剂	巴西棕榈蜡	纳米黏土 <sup>[46]</sup>
	紫胶	酪蛋白 <sup>[45]</sup>
改良剂	蜂蜡	乳清蛋白 <sup>[47]</sup> 魔芋葡甘露聚糖 <sup>[21]</sup>
	油酸	壳聚糖 <sup>[48]</sup>
		年糕 <sup>[45]</sup>

除了蜡类涂膜剂外,其他多数脂类受限于自身性质,很难单独成膜,一般与糖类、蛋白质等结合成复合薄膜,作为改良剂使用。紫胶是紫胶虫吸取寄主树液后分泌出的紫色天然树脂,又称虫胶、赤胶、紫草茸等,主要含有紫胶树脂、紫胶蜡和紫胶色素。Wang等<sup>[45]</sup>的研究发现,紫胶可以用于酪蛋白交联,使制备出的酪蛋白薄膜更加柔韧,随着紫胶浓度提高,薄膜的拉伸应变逐渐上升。蜂蜡是由蜂群内约两周龄工蜂腹部蜡腺分泌出来的一种脂肪性物质,在常温下呈固体状态,不溶于水,具有蜜、粉的特殊香味。Cecchini等<sup>[47]</sup>研究发现,蜂蜡的加入可以显著降低以乳清蛋白为基质薄膜的水蒸气透过率。安瑞琪等<sup>[21]</sup>同样使用蜂蜡改善了以魔芋葡甘露聚糖为基质的薄膜疏水性能。油酸是一种单不饱和脂肪酸,主要以甘油酯的形式存在于动植物体内,将其加氢加成可得到硬脂酸。Perdones等<sup>[48]</sup>利用油酸包埋肉桂精油,在壳聚糖基质中形成了稳定的胶束体系,实验证明油酸的添加有助于精油在膜干燥过程中的保留,减少薄膜中肉桂精油的损失,同时也降低了由于肉桂精油添加而导致的薄膜颜色变化。一些具有挥发性

的改良剂,如植物精油,加入可降解膜基质时往往存在较严重的损失问题,上述研究为其在进一步的开发应用提供了重要依据和参考。

## 2 膜基质中抑菌剂

目前研究中用于食品包装膜的抑菌剂根据其来源可基本分为合成抑菌剂和天然抑菌剂两类,其常见种类以及应用在薄膜中的抑制菌种如表4所示。合成抑菌剂是指那些通过人工合成的,可赋予包装薄膜抑菌性能的物质,主要包括胍基聚合物类、金属纳米颗粒类以及二氧化氯类等。而天然抑菌剂则是指那些可以直接从动物、植物或微生物中提取利用的抑菌物质。这些抑菌剂的作用机理总结为:破坏微生物细胞膜结构或改变细胞膜的渗透性;干扰微生物细胞的遗传机制;使细胞中的蛋白质变性以及干扰细胞中酶的活力。不同种类的抑菌剂都具备着各自不同的特性,而在制备抑菌膜时,人们可以通过调整基质搭配、改进生产技术或是修饰优化抑菌剂本身等方式来达到更好的结果。

表4 膜中主要抑菌剂的选用及抑制菌种  
Table 4 Selection of major antibacterial agents in films and corresponding inhibited bacterial species

类别	抑菌剂	抑制菌种
胍基聚合物类	聚己亚甲基胍盐酸盐与马铃薯淀粉 <sup>[51]</sup>	大肠杆菌 <sup>[51,53]</sup>
	聚六亚甲基胍盐酸盐与木质素 <sup>[52]</sup>	单核增生李斯特菌 <sup>[52]</sup>
合成抑菌剂	金属纳米颗粒类	银纳米颗粒 <sup>[53]</sup> 银-铜双金属纳米颗粒 <sup>[54]</sup> 二氧化钛 <sup>[55]</sup>
	二氧化氯类	葡萄糖酸- $\delta$ -内酯结合亚氯酸钠 <sup>[56]</sup> 二氧化氯微胶囊 <sup>[57]</sup>
植物来源	咸味精油 <sup>[61]</sup> 肉桂精油 <sup>[62]</sup> 柠檬草精油 <sup>[63]</sup> 辣椒素 <sup>[65]</sup> 茶多酚 <sup>[10]</sup> 原花青素 <sup>[66]</sup> 五倍子提取物 <sup>[26]</sup>	大肠杆菌 <sup>[53,55]</sup> 单核增生李斯特菌 <sup>[53-54]</sup> 金黄色葡萄球菌 <sup>[55]</sup> 鼠伤寒沙门氏菌 <sup>[54]</sup> 白色念珠菌 <sup>[55]</sup> 黑曲霉 <sup>[55]</sup>
	天然抑菌剂	金黄色葡萄球菌 <sup>[10,61,65-66]</sup> 单核增生李斯特菌 <sup>[61-62,66]</sup> 大肠杆菌 <sup>[10,61-62,65-66]</sup> 蜡样芽胞杆菌 <sup>[61]</sup> 荧光假单胞菌 <sup>[62]</sup> 沙门氏菌 <sup>[66]</sup> 乳杆菌 <sup>[62]</sup> 酵母菌 <sup>[63]</sup> 指状青霉 <sup>[26]</sup> 黑曲霉 <sup>[26]</sup> 霉菌 <sup>[63]</sup>
动物来源	蜂胶 <sup>[7,67]</sup> 溶菌酶 <sup>[68-69]</sup>	金黄色葡萄球菌 <sup>[67]</sup> 鼠伤寒沙门氏菌 <sup>[67]</sup> 荧光假单胞菌 <sup>[68]</sup> 腐败希瓦氏菌 <sup>[68]</sup> 藤黄微球菌 <sup>[69]</sup> 大肠杆菌 <sup>[67]</sup> 黑曲霉 <sup>[7]</sup>
	微生物来源	乳酸链球菌素 <sup>[32]</sup> 噬菌体 <sup>[27,72]</sup>

### 2.1 合成抑菌剂

2.1.1 胍基聚合物类 胍是一种含氮的有机强碱,具有较强的水溶性,其聚合物凭借广谱抗菌性、高效杀菌率以及对哺乳动物的低毒性而在食品包装开发中广受欢迎<sup>[49]</sup>。胍基聚合物可以通过静电作用结合带有负电荷的细菌细胞表面,破坏细胞膜的通透性,使

细胞内容物泄露,从而杀死细菌<sup>[50]</sup>。与多糖及其衍生物结合成复合物后,胍基聚合物的稳定性及其生物相容性均可以得到一定的改善。Wei 等<sup>[51]</sup>将聚己亚甲基胍盐酸盐与马铃薯淀粉复合,并加入至可降解的聚己二酸丁二酸酯中制备薄膜,实验发现淀粉的结合可以显著降低复合物对薄膜拉伸强度的影响,同时即使微量(1 mg/mL)的复合物添加也能赋予薄膜对大肠杆菌具有较强的抑制性能。与之类似,Wei 等<sup>[52]</sup>利用木质素与聚六亚甲基胍盐酸盐制备出一种新型纳米颗粒,并将其加入至纤维素纳米纤维中制备薄膜,实验发现纳米颗粒的加入使薄膜对单核增生李斯特菌和大肠杆菌表现出较强的抑制性能。此外,由于胍基聚合物本身的所带的正电荷,其在膜基质中往往表现出良好的分散性,这可以在一定程度上提高薄膜密度。

**2.1.2 金属纳米颗粒类** 有些金属及其氧化物的纳米颗粒可以破坏细菌膜结构或能量代谢过程,具有稳定性、广谱抗菌性、长效性等优点,而且不会使细菌产生耐药性,是一种非常理想的抑菌剂,其中纳米银尤受人们青睐。Shankar 等<sup>[53]</sup>将纳米银颗粒加入到果胶基质中制备薄膜,研究发现薄膜对大肠杆菌和单核增生李斯特菌有优良的抑菌性能,且薄膜对大肠杆菌的抑制作用更强,但纳米银颗粒的添加也影响了果胶膜的颜色和透光性,使薄膜颜色由半透明的白色转化为棕黄色。与一般的单金属纳米颗粒相比,双金属纳米颗粒由于其组分间的协同作用,往往具有更独特的催化活性。Arfat 等<sup>[54]</sup>制备出了一种银—铜双金属纳米颗粒,并将其加入到鱼皮明胶中,使得薄膜对革兰氏阳性菌(单核增生李斯特菌)和阴性菌(鼠伤寒沙门氏菌)均具有了较强的抑制能力,同时银—铜纳米颗粒会使薄膜透明度下降、抗紫外线透过性能和机械性能提高。除此之外,纳米二氧化钛颗粒因具备良好的光催化抑菌活性以及稳定性,也常被用于抑菌膜开发中。其杀菌机理为在光线(紫外光、可见光等)照射下,催化水或氧气产生羟基自由基和活性氧,破坏细菌细胞结构或影响正常代谢活动。肖等人将纳米二氧化钛颗粒加入壳聚糖中,实验中单一壳聚糖薄膜对大肠杆菌抑制效果较微弱,6 h 内仅将大肠杆菌由  $3.5 \times 10^6$  CFU/mL 杀灭至  $10^5$  CFU/mL,而加入纳米二氧化钛的薄膜则可将其完全杀灭,同时薄膜对多种微生物(大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠菌以及黑曲霉)均具有抑菌效果<sup>[55]</sup>。然而尽管目前为止并没有直接证据说明纳米材料会对人体产生危害,但研究人员仍不能放松对其安全性的警惕,尤其是当其加入食品包装,直接与食品相接触的时候,因此相关的迁移率测试以及安全性分析等仍是非常有必要的。

**2.1.3 二氧化氯类** 二氧化氯是公认的高效杀菌剂,可以穿透微生物细胞壁,氧化细胞内的含有巯基的酶,破坏它们蛋白质的合成,从而起到抑菌作用。但

由于二氧化氯的不稳定性,它无法像其他抑菌剂一样直接添加,而是需要通过特殊技术来控制释放。Zhou 等<sup>[56]</sup>利用葡萄糖酸- $\delta$ -内酯结合亚氯酸钠制成复合物,并将其加入到聚乳酸薄膜中,实验发现薄膜产生的二氧化氯在 4 h 内可以完全杀灭接种于番茄表面的沙门氏菌和大肠杆菌,且薄膜在 14 h 后仍具有良好的保鲜效果。除此之外,微胶囊技术也可以用于原料处理,以实现二氧化氯在抑菌膜的可控释放。如 Zhang 等<sup>[57]</sup>将含有二氧化氯的微胶囊加入到聚乳酸薄膜中,并用于芒果的防腐包装,以失重率、硬度、维生素 C 和可滴定酸等为指标,实验发现 21 h 后薄膜包覆组仍具备良好性状,而对照组已腐败变质,失去可食用价值。上述研究说明通过高新技术可有效改善二氧化氯在膜基质中的稳定性,控制二氧化氯的释放,这对其在可降解抑菌膜的开发应用中具有重要意义。

## 2.2 天然抑菌剂

### 2.2.1 植物来源类

**2.2.1.1 植物精油** 植物精油是从植物的叶、花、种子、果实、根和树皮等部位中提取而来,多具备广谱抑菌性和低毒低刺激等特点,在近年来的抑菌膜开发中被广泛应用<sup>[58]</sup>。植物精油凭借其强疏水性,可以与微生物细胞膜和线粒体中的脂质相互作用,破坏细胞膜的结构和通透性,引起细胞内成分的泄漏,抑制微生物生物膜的形成<sup>[59]</sup>;也可以通过产生 ROS 破坏微生物的蛋白质、DNA、核糖体等,引起细胞的代谢损伤、氧化损伤<sup>[60]</sup>。但是,因为精油大多成分复杂,其抑菌机制并不统一,故不同精油制成的抑菌膜的抑菌性能也往往各不相同。Atef 等<sup>[61]</sup>将咸味精油添加进了琼脂、纤维素复合膜中,研究发现复合膜对革兰氏阳性菌(单核增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽胞杆菌)的抑制效果强于革兰氏阴性菌(大肠杆菌)。而在 Ojagh 等<sup>[62]</sup>在向壳聚糖薄膜中添加肉桂精油的实验中,肉桂精油的加入降低了薄膜的亲水性和拉伸应变,与单一壳聚糖薄膜相比,复合膜对单核增生李斯特菌、大肠杆菌、植物乳杆菌、萨氏乳杆菌和荧光假单胞菌的抑制效果显著提高,但低浓度的肉桂精油加入对植物乳杆菌并无明显抑制作用。除此之外,Azarakhsh 等<sup>[63]</sup>研究发现,加入柠檬草精油后的海藻酸钠薄膜则对鲜切菠萝保存过程中的霉菌和酵母菌具备显著的抑制作用。然而植物精油一般具有挥发性和热敏性,以其制备的可降解抑菌食品包装膜往往存在着抑菌剂的高损耗问题,以及由此产生的包装膜使用寿命过短问题,需要进一步的研究以提高改良剂的利用率<sup>[48]</sup>。

**2.2.1.2 其他** 除了精油外,植物在生长过程中还会产生一些其他具有抗菌活性的物质,包括生物碱类、萜类、黄酮类等。与精油类似,这些天然活性物质同样可以通过阻止微生物生物膜形成,破坏细胞膜结构和通透性等起到抑菌效果,且往往具有杀菌速度快、

加工方便,不易造成细菌耐药性等特性,故也常用被作抑菌膜的抑菌剂<sup>[64]</sup>。Su等<sup>[65]</sup>将辣椒素加入到乙基纤维素膜中后,发现辣椒素浓度越高,薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果越强,且薄膜对金黄色葡萄球菌杀菌效果强于大肠杆菌。与之类似,Aloui等<sup>[26]</sup>将五倍子提取物加入海藻酸钠薄膜中后,尽管薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均表现出良好的抑菌活性,但薄膜对受试真菌(黑曲霉、指状青霉)并无明显抑制作用。除了抑菌效果之外,这些植物产物往往还可以在膜的制备过程中起到改良剂的作用。Lei等<sup>[10]</sup>将茶多酚加入至魔芋葡甘露聚糖、果胶的复合膜中后,由于茶多酚与基质间的氢键相互作用,复合膜的拉伸强度和阻隔性能均得到了提升,同时复合膜对金黄色葡萄球菌的抑制性能要强于大肠杆菌。与之类似,Bi等<sup>[66]</sup>利用原花青素结合壳聚糖,同样利用氢键相互作用使薄膜更加致密,且原花青素的加入提高了壳聚糖薄膜的抗氧化性能,同时薄膜对革兰氏阳性菌(金黄色葡萄球菌、单核增生李斯特菌)的抑制效果要强于革兰氏阴性菌(大肠杆菌、沙门氏菌)。上述研究说明了这些既具有良好的抑菌性能,又可以通过自身羟基、羧基等基团与膜基质形成氢键等相互作用力的天然产物在可降解抑菌膜的开发应用中具有巨大的潜力。

## 2.2.2 动物来源类

### 2.2.2.1 蜂胶

蜂胶是由工蜂采集的植物树脂与其上颚腺、蜡腺等分泌物混合形成的具有黏性的固体胶状物,包含了各种活性物质,具备优良的抗氧化性、抑菌性。Bertotto等<sup>[67]</sup>以木薯淀粉和巴西蜂胶副产物为原料,制备出的薄膜对金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门氏菌和大肠杆菌均具有显著的抑制性能,且对金黄色葡萄球菌抑制效果更好。与之类似,Pérez-vergara等<sup>[7]</sup>同样制备了木薯淀粉基薄膜,并添加蜂蜡以降低薄膜的水蒸气透过率和含水率,而蜂胶乙醇提取物的加入则使薄膜对黑曲霉产生了良好的抑制作用。

### 2.2.2.2 溶菌酶

溶菌酶广泛存在于动物组织、唾液、泪液、血浆以及禽类蛋清等,同时它也是一种天然抑菌剂,可以水解细菌细胞壁中的N-乙酰胞壁酸和N-乙酰氨基葡萄糖间的 $\beta$ -1,4糖苷键,导致细胞壁破裂,细菌内容物泄露而死亡。Li等<sup>[68]</sup>将溶菌酶加入到以壳聚糖、海藻酸钠为基质的双层膜中,发现其对导致鱼类腐败的荧光假单胞菌、腐败希瓦氏菌具有良好的抑制效果,可以破坏细菌细胞膜,有益于鱼类食品保鲜。但薄膜的加工工艺同样可以影响加入溶菌酶后抑菌膜的抑菌效果。Wang等<sup>[69]</sup>将溶菌酶加入海藻酸钠薄膜时发现,超声处理后薄膜对藤黄微球菌的抑菌性能显著提高,推测可能与超声波处理改变了溶菌酶的二级和三级结构,增加了膜基质上溶菌酶的固定效率以及超声波使膜基质结构松散,促进溶菌酶释放有关。该研究不仅证明了超声波处理与

溶菌酶在薄膜中抑菌效果的关系,也为进一步提高薄膜中抑菌剂的高效利用与释放提供了新思路。

## 2.2.3 微生物来源类

### 2.2.3.1 乳酸链球菌素

乳酸链球菌素是一种由乳酸链球菌产生的小分子多肽类物质,由于其进入人体后可被分解为氨基酸,无毒无害,因此常常作为抑菌剂应用于可降解薄膜生产中<sup>[70]</sup>。但乳酸链球菌素抗菌谱较窄,针对革兰氏阳性菌,特别是金黄色葡萄球菌、链球菌、肉毒梭状芽孢杆菌和其他厌氧芽孢杆菌作用很强,但对革兰氏阴性菌、酵母菌和霉菌的抑制效果明显减弱<sup>[71]</sup>。Venkatachalam等<sup>[32]</sup>以壳聚糖为基质,复配使用了丁香精油和乳酸链球菌素,实验发现丁香精油与乳酸链球菌素存在抑菌协同作用,两者复配使用的薄膜针对猪肉中乳酸菌、嗜冷菌(主要为假单胞菌)等抑制效果显著强于各自单一添加的薄膜。薄膜的抑菌性能与所添加的抑菌剂直接相关,而上述研究则可为抑菌剂在薄膜中的复配使用提供一定的启发。

### 2.2.3.2 噬菌体

噬菌体是一种可以感染和裂解细菌的特异性抑菌剂,且其自然存在于许多食品表面,较为安全,也常被用于抑菌膜的制备。同时噬菌体作为一种病毒,个体微小,作为抑菌剂加入后并不会对薄膜的性能产生明显的影响。Weng等<sup>[72]</sup>制备了包含噬菌体的明胶薄膜,实验发现即使最大浓度( $1.75 \times 10^8$  PFU/mL)的噬菌体添加也未对明胶膜的机械性能、阻隔性能以及微观结构产生影响,同时抑菌试验证明薄膜对金黄色葡萄球菌有显著的抑制效果。除此之外,噬菌体对于外界环境变化耐受性较强,当作为抑菌剂加入薄膜中后也可以保持较好的活性。Alves等<sup>[27]</sup>将噬菌体嵌入到海藻酸钠薄膜上,实验发现冷藏条件下保存8周后膜中噬菌体的活性才开始下降,而在人工接种荧光假单胞菌的鸡胸片上进行试验后,证明了加入噬菌体的海藻酸钠薄膜在5d后仍具备较强抑菌保鲜能力。

## 3 结论与展望

本文主要介绍了常用于开发可降解抑菌食品包装膜的生物基质材料与改良剂(抑菌剂),并对其阻隔性能、机械性能和抑菌性能等进行了简要的分析,同时讨论了成分间的相互作用对薄膜性能带来的影响,对相关领域的研究开发具有一定的参考意义。由于普通的塑料保鲜膜难以解决当今社会中的食品安全与环境问题,开发可降解抑菌膜已成为了食品包装行业的未来发展方向之一。与此同时,可降解抑菌膜的发展也带来了新的挑战,如改良剂(抑菌剂)的损耗问题、安全性问题以及其对食品包装感官性质的影响问题等。然而随着新技术的开发使用及规范标准的完善,相信这些问题都将得到解决。在未来的食品包装领域,可降解抑菌食品包装膜必将占据一席之地,为人们提供更营养、安全的优质食品。

## 参考文献

- [1] 张雅洁. 塑料污染的归因分析及法律规制研究——评《中国塑料污染治理理念与实践》[J]. 塑料工业, 2022, 50(9): 202. [ZHANG Y J. Attribution analysis and legal regulation of plastic pollution: Comments on the concept and practice of plastic pollution control in china[J]. *Plastics Industry*, 2022, 50(9): 202.]
- [2] CHEN W Z, MA S B, WANG Q K, et al. Fortification of edible films with bioactive agents: A review of their formation, properties, and application in food preservation[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 62(18): 5029–5055.
- [3] GUO C Y, GUO H G. Progress in the degradability of biodegradable film materials for packaging[J]. *Membranes*, 2022, 12(5): 500.
- [4] MOTELICA L, FICAI D, FICAI A, et al. Biodegradable antimicrobial food packaging: Trends and perspectives[J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1438.
- [5] ZHAO Y, AN J J, SU H X, et al. Antimicrobial food packaging integrating polysaccharide-based substrates with green antimicrobial agents: A sustainable path[J]. *Food Research International*, 2022, 155: 111096.
- [6] NESIC A, CABRERA-BARJAS G, DIMITRIJEVIC-BRANKOVIC S, et al. Prospect of polysaccharide-based materials as advanced food packaging[J]. *Molecules*, 2019, 25(1): 135.
- [7] PÉREZ-VERGARA L D, CIFUENTES M T, FRANCO A P, et al. Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis[J]. *NFS Journal*, 2020, 21: 39–49.
- [8] FAKHOURI F M, MARTELLI S M, CAON T, et al. Edible films and coatings based on starch/gelatin: Film properties and effect of coatings on quality of refrigerated Red Crimson grapes[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 109: 57–64.
- [9] TONGDEESOONTORN W, MAUER L J, WONGRUONG S, et al. Antioxidant films from cassava starch/gelatin biocomposite fortified with quercetin and TBHQ and their applications in food models[J]. *Polymers*, 2021, 13(7): 1117.
- [10] LEI Y L, WU H J, JIAO C, et al. Investigation of the structural and physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of pectin-konjac glucomannan composite edible films incorporated with tea polyphenol[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 128–135.
- [11] GALUS S, LENART A. Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(4): 459–465.
- [12] MANNOZZI C, CECCHINI J P, TYLEWICZ U, et al. Study on the efficacy of edible coatings on quality of blueberry fruits during shelf-life[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 85: 440–444.
- [13] NSENGIYUMVA E M, ALEXANDRIDIS P. Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 216: 583–604.
- [14] LI F, ZHE T T, MA K X, et al. A naturally derived nanocomposite film with photodynamic antibacterial activity: New prospect for sustainable food packaging[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(44): 52998–53008.
- [15] ZABIHOLLAHI N, ALIZADEH A, ALMASI H, et al. Development and characterization of carboxymethyl cellulose based probiotic nanocomposite film containing cellulose nanofiber and inulin for chicken fillet shelf life extension[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 160: 409–417.
- [16] TESHAY S Z, MAGWAZA L S, MBILI N, et al. Carboxyl methylcellulose (CMC) containing moringa plant extracts as new postharvest organic edible coating for Avocado (*Persea americana* Mill.) fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 226: 201–217.
- [17] 刘义武, 刘莹, 谢峰, 等. 果胶/黄原胶共混膜的制备工艺优化与表征[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 298–301, 313. [LIU Y W, LIU Y, XIE F, et al. Preparation and properties of pectin/xanthan gum blend films[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(6): 298–301, 313.]
- [18] ZHENG M, CHEN J, TAN K B, et al. Development of hydroxypropyl methylcellulose film with xanthan gum and its application as an excellent food packaging bio-material in enhancing the shelf life of banana[J]. *Food Chemistry*, 2021, 374: 131794.
- [19] FAN Y L, YANG J, DUAN A B, 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.
- [20] WU C H, LI Y Z, DU Y, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan-based bionanocomposite film for active food packaging[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 682–690.
- [21] 安瑞琪, 黄建初, 李崇高, 等. 浓缩乳清蛋白/魔芋葡甘聚糖复配蜂蜡膜[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(11): 125–129. [AN R Q, HUANG J C, LI C G, et al. Whey protein concentrate/konjac glucomannan composite beeswax membrane[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2016, 32(11): 125–129.]
- [22] YAN Y S, DUAN S Q, ZHANG H L, et al. Preparation and characterization of Konjac glucomannan and pullulan composite films for strawberry preservation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 243: 116446.
- [23] LIU J, YANG S Q, LI X T, et al. Alginate oligosaccharides: Production, biological activities, and potential applications[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(6): 1859–1881.
- [24] QIN Y M. Alginate fibres: an overview of the production processes and applications in wound management[J]. *Polymer International*, 2007, 57(2): 171–180.
- [25] DOU L X, LI B F, ZHANG K, et al. Physical properties and antioxidant activity of gelatin-sodium alginate edible films with tea polyphenols[J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 118: 1377–1383.
- [26] ALOUI H, DESHMUKH A R, KHOMLAEM C, et al. Novel composite films based on sodium alginate and gallnut extract with enhanced antioxidant, antimicrobial, barrier and mechanical properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106508.
- [27] ALVES D, MARQUES A, MILHO C, et al. Bacteriophage  $\phi$ IBB-PF7A loaded on sodium alginate-based films to prevent microbial meat spoilage[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 291: 121–127.
- [28] CRUZ A I C, COSTA M D C, MAFRA J F, et al. A sodium alginate bilayer coating incorporated with green propolis extract as a powerful tool to extend *Colossoma macropomum* fillet shelf-life[J]. *Food Chem*, 2021, 355: 129610.
- [29] ZIMET P, MOMBRÚ Á W, MOMBRÚ D, et al. Physico-chemical and antilisterial properties of nisin-incorporated chitosan/carboxymethyl chitosan films[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 219: 334–343.
- [30] YANG J, KWON G J, HWANG K, et al. Cellulose-chitosan antibacterial composite films prepared from libr solution[J]. *Polymers*, 2019, 10(10): 1058.
- [31] NGUYEN T T, DAO U T T, THI B Q P, et al. Enhanced an-

- timicrobial activities and physicochemical properties of edible film based on chitosan incorporated with *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl. leaf extract[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 140: 105487.
- [ 32 ] VENKATACHALAM K, LEKJING S. A chitosan-based edible film with clove essential oil and nisin for improving the quality and shelf life of pork patties in cold storage[J]. *RSC Adv*, 2020, 10 (30): 17777–17786.
- [ 33 ] LIN L, MAO X F, SUN Y H, et al. Antibacterial properties of nanofibers containing chrysanthemum essential oil and their application as beef packaging[J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 292: 21–30.
- [ 34 ] 任佳欣, 遇世友, 许锡凯, 等. 可食性蛋白膜在食品包装中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 320–326. [ REN J X, YU S Y, XU X K, et al. Research progress on the application of edible protein film in food packaging[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(9): 320–326. ]
- [ 35 ] MENGXUE D, LIANGJIE T, JIAYU L, et al. Improving physicochemical properties of edible wheat gluten protein films with proteins, polysaccharides and organic acid[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 154: 112868.
- [ 36 ] ZHAO G Y, ZHOU C Y, FAN F Y. Preparation and properties of soy protein isolate/cotton-nanocrystalline cellulose films[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2021: 5498136.
- [ 37 ] WU T, DAI S D, CONG X, et al. Succinylated soy protein film coating extended the shelf life of apple fruit[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4): e13024.
- [ 38 ] LU J Y, LI T, MA L, et al. Optimization of heat-sealing properties for antimicrobial soybean protein isolate film incorporating diatomite/thymol complex and its application on blueberry packaging [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100690.
- [ 39 ] 包俊青, 唐亚丽, 卢立新, 等. 肉桂醛对明胶基肠衣膜的性能影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 1–6. [ BAO J Q, TANG Y L, LU L X, et al. Effect of cinnamaldehyde on the performance of gelatin-based edible casing[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 1–6. ]
- [ 40 ] RIAHI Z, PRIYADARSHI R, RHIM J W, et al. Gelatin-based functional films integrated with grapefruit seed extract and TiO<sub>2</sub> for active food packaging applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106314.
- [ 41 ] BERMÚDEZ-ORIA A, RODRÍGUEZ-GUTIÉRREZ G, RUBIO-SENENT F, et al. Effect of edible pectin-fish gelatin films containing the olive antioxidants hydroxytyrosol and 3,4-dihydroxyphenylglycol on beef meat during refrigerated storage[J]. *Meat Science*, 2018, 148: 213–218.
- [ 42 ] DEHGHAN T L, KHOSHKHO O, AZIZI M H. Application of edible coating made of sturgeon gelatin and *Portulaca oleracea* extract for improving the shelf life of fish sausages[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15: 4306–4313.
- [ 43 ] PICCHIO M L, LINCK Y G, MONTI G A, et al. Casein films crosslinked by tannic acid for food packaging applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 424–434.
- [ 44 ] MONTES-DE-OCA-AVALOS J M, ALTAMURA D, CANDAL R J, et al. Relationship between nano/micro structure and physical properties of TiO<sub>2</sub>-sodium caseinate composite films[J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 129–139.
- [ 45 ] WANG R, AN N, FENG W, et al. Antibacterial fresh-keeping films assembled by synergistic interplay between casein and shellac[J]. *Food Biophysics*, 2021, 17: 47–58.
- [ 46 ] MOTAMED I, NASIRI J, MALIDARREH T R, et al. Performance of carnauba wax-nanoclay emulsion coatings on postharvest quality of ‘Valencia’ orange fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 240: 170–178.
- [ 47 ] CECCHINI J P, SPOTTI M J, PIAGENTINI A M, et al. Development of edible films obtained from submicron emulsions based on whey protein concentrate, oil/beeswax and brea gum[J]. *Food Science and Technology International*, 2017, 23(4): 371–381.
- [ 48 ] PERDONES Á, VARGAS M, ATARÉS L, et al. Physical, antioxidant and antimicrobial properties of chitosan-cinnamon leaf oil films as affected by oleic acid[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 36: 256–264.
- [ 49 ] SUN L J, YANG S S, QIAN X, et al. High-efficacy and long term antibacterial cellulose material: anchored guanidine polymer via double “click chemistry”[J]. *Cellulose*, 2020, 27: 8799–8812.
- [ 50 ] CHOI H, KIM K J, LEE D G. Antifungal activity of the cationic antimicrobial polymer-polyhexamethylene guanidine hydrochloride and its mode of action[J]. *Fungal Biology*, 2017, 121(1): 53–60.
- [ 51 ] WEI D F, WANG H, ZIAEE Z, et al. Non-leaching antimicrobial biodegradable PBAT films through a facile and novel approach[J]. *Biomaterials Advances*, 2015, 58: 986–991.
- [ 52 ] WEI W, CHENGRONG Q, WEI L, et al. Design of antibacterial cellulose nanofibril film by the incorporation of guanidine-attached lignin nanoparticles[J]. *Cellulose*, 2022, 29: 3439–3451.
- [ 53 ] SHANKAR S, TANOMROD N, RAWDKUEN S, et al. Preparation of pectin/silver nanoparticles composite films with UV-light barrier and properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 92: 842–849.
- [ 54 ] ARFAT Y A, AHMED J, HIREMATH N, et al. Thermo-mechanical, rheological, structural and antimicrobial properties of bio-nanocomposite films based on fish skin gelatin and silver-copper nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 62: 191–202.
- [ 55 ] ZHANG X D, XIAO G, WANG Y Q, et al. Preparation of chitosan-TiO<sub>2</sub> composite film with efficient antimicrobial activities under visible light for food packaging applications[J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 169: 101–107.
- [ 56 ] ZHOU S Y, JIN T, SHEEN S, et al. Development of sodium chlorite and glucono delta-lactone incorporated PLA film for microbial inactivation on fresh tomato[J]. *Food Research International*, 2020, 132: 109067.
- [ 57 ] ZHANG B D, HUANG C X, ZHANG L Y, et al. Application of chlorine dioxide microcapsule sustained-release antibacterial films for preservation of mangos[J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 56 (3): 1095–1103.
- [ 58 ] CHEN K, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Edible flower essential oils: A review of chemical compositions, bioactivities, safety and applications in food preservation[J]. *Food Res Int*, 2021, 139: 109809.
- [ 59 ] GAO Z P, ZHONG W M, CHEN K Y, et al. Chemical composition and anti-biofilm activity of essential oil from *Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle against *Listeria monocytogenes*[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 144: 112036.
- [ 60 ] GUO J J, GAO Z P, LI G Y, et al. Antimicrobial and antibiofilm efficacy and mechanism of essential oil from *Citrus Changshan-huyou* Y. B. *chang* against *Listeria monocytogenes*[J]. *Food Control*, 2019, 105: 256–264.
- [ 61 ] ATEF M, REZAEI M, BEHROOZ R. Characterization of physical, mechanical, and antibacterial properties of agar-cellulose bionanocomposite films incorporated with savory essential oil[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 150–157.
- [ 62 ] OJAGH S M, REZAEI M, RAZAVI S H, et al. Development

and evaluation of a novel biodegradable film made from chitosan and cinnamon essential oil with low affinity toward water[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(1): 161–166.

[ 63 ] AZARAKHSH N, OSMAN A, GHAZALI H M, et al. Lemongrass essential oil incorporated into alginate-based edible coating for shelf-life extension and quality retention of fresh-cut pineapple[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 88: 1–7.

[ 64 ] DENG H T, ZHU J Y, TONG Y Q, et al. Antibacterial characteristics and mechanisms of action of *Aronia melanocarpa* anthocyanins against *Escherichia coli*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112018.

[ 65 ] SU X C, YANG Z, TAN K B, et al. Preparation and characterization of ethyl cellulose film modified with capsaicin[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241: 116259.

[ 66 ] BI F Y, ZHANG X, BAI R Y, et al. Preparation and characterization of antioxidant and antimicrobial packaging films based on chitosan and proanthocyanidins[J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 134: 11–19.

[ 67 ] BERTOTTO C, BILCK A P, YAMASHITA F, et al. Development of a biodegradable plastic film extruded with the addition of

a Brazilian propolis by-product[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 157: 113124.

[ 68 ] LI Q Y, XU J X, ZHANG D D, et al. Preparation of a bilayer edible film incorporated with lysozyme and its effect on fish spoilage bacteria[J]. *Journal of Food Safety*, 2020, 40(5): e12832.

[ 69 ] WANG D L, LÜ R L, MA X B, et al. Lysozyme immobilization on the calcium alginate film under sonication: Development of an antimicrobial film[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 1–8.

[ 70 ] WU Y H, LI Q, ZHANG X Z, et al. Cellulose-based peptidopolysaccharides as cationic antimicrobial package films[J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 128: 673–680.

[ 71 ] QUICHABA M B, MOREIRA T F M, DE OLIVEIRA A, et al. Biopreservatives against foodborne bacteria: combined effect of nisin and nanocapsulated curcumin and co-encapsulation of nisin and curcumin[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 60: 581–589.

[ 72 ] WENG S, LÓPEZ A, SÁEZ-ORVIZ S, et al. Effectiveness of bacteriophages incorporated in gelatine films against *Staphylococcus aureus*[J]. *Food Control*, 2021, 121: 107666.