

食品包装用抗菌膜研究进展

柴三中, 赵亚珠

(天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 通过对国内外食品包装用抗菌膜研究现状进行分析, 并针对抗菌膜目前存在的问题总结出今后发展趋势, 为促进食品包装用抗菌膜的研发提供指导。**方法** 介绍抗菌剂的抑菌作用机制及其在食品包装膜中的应用现状; 总结国内外食品包装用抗菌膜最新研究成果, 并分析国内外研究成果之间存在的差距。**结论** 食品包装用抗菌膜的研究取得了一定成果, 还需在抑菌效果及作用方式、食品安全风险评估、产业化应用等方面进行深入研究。随着抗菌膜在食品安全、抗菌能力、产业化工艺等方面存在的问题被解决, 食品包装用抗菌膜将在食品包装领域发挥重要作用。

关键词: 食品包装; 抗菌膜; 抑菌机理; 防腐保鲜

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)15-0178-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.15.020

Research Progress of Antimicrobial Films for Food Packaging

CHAI San-zhong, ZHAO Ya-zhu

(Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the research status of antimicrobial films for food packaging at home and abroad and summarize the future development trends considering the existing problems, thus providing guidance for the research and development of antimicrobial films for food packaging. The antimicrobial mechanisms of antimicrobial agents and their application status in preparing antimicrobial films for food packaging were introduced. The latest researches of antimicrobial films for food packaging at home and abroad were summarized and the gaps between these researches were analyzed. Some progresses have been achieved in researches of antimicrobial films for food packaging and in-depth researches are still required in terms of antimicrobial effects, assessment of food safety risks, and industrialization. With the problems of antimicrobial films in food safety, antimicrobial ability, industrial technology, etc. being solved, antimicrobial films for food packaging will play an important role in the field of food packaging.

KEY WORDS: food packaging; antimicrobial films; antimicrobial mechanism; preservation

食品中含有丰富的营养物质, 细菌/霉菌容易在食品外表/内部生长繁殖, 极易导致食品变质^[1], 不仅会造成巨大的经济损失^[2], 还可能影响人体健康^[3]。美国曾发生过由菠菜中大肠杆菌引起食源性疾病的的事件, 导致3人死亡, 多人患病^[4]。在众多的食品中, 由于防腐保鲜措施不当, 会造成果蔬等生鲜食品损失

严重。目前, 我国果蔬等因贮藏保鲜措施不当导致损失率高达20%~35%^[5], 而发达国家这一损失率约为10%~20%^[6]。为减少因食品腐烂造成的损耗, 人们经常将防腐剂添加到食品中^[7]或直接喷洒至食品表面。一些防腐剂(如化学防腐剂)一旦被过量摄入会影响人体健康, 甚至会出现致癌性、致畸性和中毒等

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: 天津职业大学校企协同创新项目(2021070204); 天津职业大学横向课题(60002/604180)

作者简介: 柴三中(1978—), 硕士, 天津职业大学副教授, 主要研究方向包装印刷材料、包装与印刷机械设计与优化、运动分析等。

危害^[8]。此外, 向食品直接添加防腐剂也会影响食品的口感和风味, 降低其品质。

如何有效减少果蔬等生鲜食品的腐烂成为人们亟待解决的问题。塑料薄膜作为一种常用的食品包装材料, 将其与抗菌剂结合可制备出食品包装用抗菌膜, 可在一定程度上降低食品的腐烂损耗。近年来, 科研工作者对食品包装用抗菌膜进行了一些研究。在食品包装用抗菌膜中, 抗菌剂作为主要功能成分, 对抗菌材料及产品的抗菌活性起着至关重要作用。如何将抗菌剂与成膜基材结合, 制备出满足食品防腐保鲜要求(抗菌能力、抗菌有效期、食品安全性等)的抗菌膜产品, 成为目前食品包装领域的一个重要研究方向。文中阐述抗菌剂的抑菌作用机制及其在食品包装膜中的应用现状, 介绍抗菌膜的主要加工方法, 并针对国内外最新研究成果进行分析和总结, 结合抗菌膜目前存在的问题指出未来研究方向, 为促进今后食品包装用抗菌膜的研发及其产业化应用提供指导。

1 食品包装用抗菌膜常用抗菌剂

抗菌膜可有效减少食品中致腐细菌/霉菌等微生物的繁殖和生长, 从而延长食品的货架寿命。抗菌剂的选用应着重考虑其食品安全性、抑菌能力、生产成本、绿色环保等因素。目前, 食品包装用抗菌膜常用抗菌剂主要有: 无机抗菌剂(金属系抗菌剂、光催化型无机抗菌剂等)、有机抗菌剂(低分子有机抗菌剂、高分子有机抗菌剂)、天然抗菌剂(植物精油、壳聚糖等)^[9]。

1.1 无机抗菌剂

在食品包装用抗菌膜中, 使用较多的无机抗菌剂有金属系抗菌剂和光催化型无机抗菌剂。目前应用较多的金属系抗菌剂为金属离子(如 Ag^+ 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 等), 在实际操作过程中经常使用沸石、介孔材料等吸附介质, 在负载金属离子后形成一种载体型抗菌剂(如载银沸石)。在金属系抗菌剂中, 银离子对微生物的杀菌作用极为显著, 银离子的抑菌机制研究较多。已有研究评估了银纳米粒子及其相关产品的抗菌潜力, 发现这些纳米银粒子会引发氧化应激、蛋白质功能障碍、细胞膜和 DNA 损伤, 从而导致微生物细胞损伤^[10]。

在光催化型无机抗菌剂中, TiO_2 和 ZnO 的应用最为广泛。 TiO_2 的抑菌机制主要包括以下几方面^[11]。

1) 辅酶 A 氧化。微生物细胞内的辅酶 A 被氧化, 造成微生物细胞呼吸作用衰退, 从而导致微生物菌体死亡。

2) 破坏细胞壁/膜。 TiO_2 会损伤细胞壁和细胞膜, 导致钾离子发生非正常泄漏, 最终造成微生物细胞失活。

3) 破坏遗传物质。 TiO_2 产生的 $\cdot\text{OH}$ 可直接破坏

微生物的 DNA 双链螺旋结构, 从而阻碍微生物细胞的 DNA 复制及细胞膜的代谢功能。纳米 ZnO 具有自激活特性, 在紫外光/可见光照射条件下, 表面电子(e^-)被激发, 形成的带正电荷空穴易与 O_2 和 H_2O 生成 $\cdot\text{OH}$ 、 H_2O_2 、 O^{2-} 等活性氧物质。部分活性氧物质可以穿透细胞壁(如 H_2O_2)或积聚在菌体表面引起菌体细胞膜破裂(如 $\cdot\text{OH}$)^[12]。

无机抗菌剂由于具有抗菌能力不易失效、耐热稳定性较好等特点, 被广泛应用于制备食品包装用抗菌膜, 尤其适用于加工温度较高的制备工艺(如挤出吹塑等)中。在实际应用中, 也存在一些缺陷, 例如无机抗菌剂的安全性需进行评估; 抗菌剂从抗菌膜向食品中的迁移规律尚不明确; 无机抗菌剂大多为接触型抗菌剂, 对未直接接触部位的抗菌效果不明显。

1.2 有机抗菌剂

食品包装用抗菌膜常用有机抗菌剂: 低分子有机抗菌剂, 主要包括有机酸类、季铵盐类、季磷盐类、双胍类等; 高分子有机抗菌剂, 一般由高分子聚合物结合抗菌基团(多以均聚、共聚、接枝等方式引入)制得。在有机抗菌剂中, 季铵盐类抗菌剂使用最广泛。目前, 一般认为季铵盐的抑菌机制^[13]为单链和双链季铵盐均可破坏微生物的细胞壁和细胞膜的完整性, 还可抑制酶的活性, 并影响细胞代谢。双链季铵盐处理微生物时还可阻碍微生物核酸和蛋白质的合成。聚合季铵盐对微生物的主要作用方式是破坏细胞壁和细胞膜结构, 引起细胞内物质泄漏, 导致微生物细胞死亡。

有机抗菌剂具有抗菌效果较好、来源广泛、容易与成膜基材混合等优点, 但也存在耐热稳定性较差、抗菌有效期不长、食品安全性不高、微生物容易对有机抗菌剂产生耐药性等缺点^[9,14], 以上这些因素影响了有机抗菌剂在抗菌膜产品中的应用。

1.3 天然抗菌剂

天然抗菌剂一般是指从植物、动物、微生物等来源获得的具有抗菌活性的成分。目前在食品包装用抗菌膜制备过程中常用的天然抗菌剂主要有植物精油和壳聚糖等。

1) 植物精油。一般采用水蒸气蒸馏或物理压榨等方式从植物的果实、根、茎、叶等部位获得的具有挥发性的混合物。一些研究表明, 部分植物精油对食品中常见致腐微生物具有很强的抑制和杀灭作用^[15-17]。植物精油的抗菌活性可归因于其含有的萜类化合物和酚类化合物^[18-19]。在植物精油中, 代表性抑菌活性成分主要有百里香酚、香芹酚、反式肉桂醛、丁香酚、香茅醛等。由于植物精油大多来源于食药同源的植物, 普遍认为其安全性较高。由于植物精油具有优异的抑菌性能, 使得它在食品活性包装中的研究

比较广泛。植物精油的抑菌机制^[20-22]：引起细胞膜结构破坏，导致细胞内蛋白质和电解质渗漏；精油能够穿透细菌细胞膜并作用于细菌的DNA；通过影响微生物三羧酸循环（TCA Cycle）的代谢物和关键酶来抑制其呼吸和代谢。

2）壳聚糖。壳聚糖具有较好的成膜特性、抗菌能力和生物降解性，是一种良好的抗菌包装候选材料。壳聚糖的抗菌机制^[23]：壳聚糖带正电荷，由于静电引力作用，扰乱了微生物细胞中负电荷原有的分布，从而干扰其细胞壁的合成，由于缺少细胞壁的支撑，细胞膜承受不了渗透压，从而导致细胞膜破裂，细胞内重要成分渗出，菌体死亡；壳聚糖可以透过细胞壁，影响细胞内部DNA和RNA的合成和复制。

天然抗菌剂具有绿色环保、对人体安全性高、抗菌效果强、抗菌谱广、来源广泛等优点，是近年来研究较多的一类抗菌剂。天然抗菌剂在加工和使用过程中也存在一些问题：部分天然抗菌剂的热稳定性较差，在较高温度的加工过程中容易分解/挥发从而导致抗菌效果下降；植物精油类抗菌膜在自然条件下由于易挥发可能会造成抗菌效果降低；此外，部分天然抗菌剂的价格相对较高。

2 食品包装用抗菌膜的种类及其研究现状

2.1 抗菌膜主要种类

1）聚烯烃基材抗菌膜。聚烯烃基材抗菌膜主要指以聚烯烃为基材，通过加入抗菌剂制得的抗菌薄膜，目前研究较多的基材主要有聚乙烯、聚丙烯等。聚烯烃基材抗菌膜的生产加工方法主要有2种：首先将抑菌剂（如纳米银或纳米ZnO等）负载于其他无机粒子（如沸石）中，然后将其与聚烯烃颗粒混合、均匀分散、吹膜制得抗菌薄膜；将抗菌单体采用接枝法负载于聚烯烃薄膜表面制备抗菌膜。

2）可降解抗菌膜。可降解抗菌膜通常指将抗菌剂与可降解成膜材料混合制备而成的抗菌薄膜。目前研究较多的可降解抗菌膜的基材主要有壳聚糖、聚乳酸（PLA）、淀粉、纤维素等，其制备方法主要有溶液浇铸法、流延法等。

3）可食用抗菌涂膜。可食用抗菌涂膜与传统意义上的包装抗菌膜有所区别，是一层附着在食品表面很薄的抗菌膜，其成膜基材通常由生物聚合物（如多糖、蛋白质等）单独或组合制成。可食用抗菌涂膜的研究较广泛，其制备方法大多为将抗菌剂、成膜物质和各种助剂制备成具有抗菌功能、质地均匀的乳液，然后将乳液涂覆于食品表面，以延长食品的货架期。

2.2 抗菌膜国外研究成果

低密度聚乙烯（LDPE）作为一种常见的包装薄

膜原料，国外一些科研工作者将抗菌剂与其混合来制备抗菌膜，并取得了一些成果。Boschetto等^[24]利用载银沸石和LDPE采用浇铸法制备了一种抗菌薄膜，这种掺入载银沸石的LDPE抗菌膜对大肠杆菌有明显抑制作用，显示出在食品包装中的应用潜力。Ittiachen等^[25]以生香蕉皮提取物为还原剂，与硝酸银溶液反应生成纳米银粒子，将LDPE原料与纳米银粒子经熔融共混后，热压成型制得纳米银粒子质量分数为3%的LDPE抗菌膜，经该抗菌膜处理后的大肠杆菌生长曲线从对数期开始发生下降，并且在整个测试期内保持稳定。Rojas等^[26]将LDPE与纳米ZnO颗粒在氮气中加热搅拌后通过热压成型制得一种抗菌LDPE纳米复合材料，它对大肠杆菌的抗菌率可达96%~99%。Suppakul等^[27]将含有罗勒精油成分（芳樟醇、甲基黑胡椒酚）与乙烯醋酸乙烯酯（EVA）的预混母料与LDPE粒料混合，通过挤出机制备出厚度为45~50 μm的LDPE抗菌膜，该抗菌膜在固体培养基和干酪系统中均表现出对微生物的抑制作用。Azlin-Hasim等^[28]将不同浓度的纳米Ag粒子与LDPE混合制备纳米Ag/LDPE复合膜，该抗菌膜结合气调包装可延长鸡胸肉片的保质期，还可显著提高鸡胸肉片的氧化稳定性（ $P<0.05$ ）。Lomate等^[29]将纳米铜粒子（Cu-NPs）掺入LDPE基质（预先在110℃下用二甲苯溶解LDPE），超声分散均匀后使用刮刀涂膜器制得一种具有强抗菌活性和阻隔性能的抗菌膜，将它用于Peda（一种印度甜乳制品）的活性包装，可有效延长Peda的保质期。以上这些抗菌膜虽然取得了一些初步成果，但仍存在一些问题，例如纳米银粒子、纳米铜粒子在与食品接触时是否会发生迁移缺乏后续研究；制备过程中使用有机溶剂是否会带来食品安全风险亦值得进一步研究。

PLA、聚乙烯醇、醋酸纤维素等作为常见的可降解材料，将抗菌剂与它们结合可制备出多种可降解抗菌膜。Muller等^[30]以乙酸乙酯为溶剂，采用浇铸法获得负载肉桂醛的PLA薄膜，通过热压PLA活性层和压缩成型的木薯淀粉膜制备双层膜。体外抑菌试验证明了负载肉桂醛的PLA/木薯淀粉的双层膜对大肠杆菌和李斯特菌都具有抗菌活性。Shankar等^[31]使用溶液流延法制备PLA基薄膜，使用氯化锌和NaOH合成ZnO纳米颗粒（ZnO NPs），并制备成PLA/ZnO NPs复合薄膜，该复合膜对大肠杆菌和李斯特菌均具有很强的抑制作用，将该复合膜应用于鱼糜的包装，显示出很强的抗菌效果。Panisa等^[32]采用PLA和负载不同浓度 Ag^+ 的天然橡胶接枝改性壳聚糖，通过熔融混合工艺制备成一种新型抗菌包装膜。使用菌落计数法对5种细菌进行抑菌活性测试，发现抗菌薄膜可减少细菌达99%以上。Lee等^[33]以琼脂和聚乙烯醇为基材，通过在基材中添加肉桂精油制得一种抗菌膜。该抗菌膜对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均具有较好的抑制作用。研究还分析了该抗菌膜中肉桂精油的释放动

力学方程, 通过数学模型发现肉桂精油释放率随温度和相对湿度的上升成比例增加, 其中相对湿度是影响肉桂精油释放率的主要因素。Nassima 等^[34]使用银纳米颗粒 (AgNPs) /明胶改性蒙脱石纳米填料 (AgM) 和百里香酚制备了基于增塑醋酸纤维素/柠檬酸三乙酯 (CA/TEC) 的纳米生物复合膜。该复合膜具有显著的抗氧化活性, 对细菌性病原菌和真菌都具有综合抗菌活性, 该研究还发现有机黏土的加入可控制银的释放, 从而获得更持久的抗菌效果。

尽管目前塑料聚合物在食品包装领域应用最为广泛, 但其回收效率低 (不到 5%), 容易导致环境中产生大量塑料污染物^[35]。活性可食用薄膜被认为是食品包装中常用合成聚合物的可接受替代品^[36]。Agarwal 等^[37]制备了一种含有香叶醇的可食用薄膜。载有香叶醇的薄膜对蜡状芽孢杆菌和大肠杆菌均显示出很强的抗菌效果, 该薄膜在食品包装应用方面具有很高的潜力。Emiroğlu 等^[38]对掺入牛至精油或百里香精油的大豆蛋白可食用薄膜的抗菌活性进行了评估, 发现其对金黄色葡萄球菌、假单胞菌等 5 种细菌表现出相似的抗菌活性。通过探索在 4 °C 冷藏期间该抗菌薄膜对新鲜碎牛肉的影响, 发现抗菌膜可使得牛肉中大肠菌群和假单胞菌属显著减少 ($P < 0.05$)。Zareie 等^[39]制备了一种含有壳聚糖和 γ 氨基丁酸的大豆蛋白可食用膜, 该抗菌可食用膜具有很强的抗氧化和抑菌性能。

2.3 抗菌膜国内研究成果

国内科研工作者在抗菌膜的研究方面也做了很多工作, 主要包括将抗菌剂与 LDPE 采用吹膜工艺制备抗菌膜, 将 PLA 与抗菌剂采用流延法制备抗菌薄膜, 采用静电纺丝制备抗菌膜等。抗菌膜在鸡胸肉、樱桃果实等的防腐保鲜应用中取得了一些成果。

国内学者利用 LDPE 和抗菌剂通过采用不同工艺制备了多种抗菌膜。薄艳娜等^[40]将纳米银粉末、添加剂、LDPE 母粒按一定比例熔融共混造粒, 并采用吹膜工艺制备了一种纳米银-LDPE 包装膜。贾晓云等^[41]采用共混挤出吹塑法制备了留兰香提取物/聚丙烯和留兰香提取物- β -环糊精-聚丙烯抗菌包装袋, 将这 2 种抗菌包装袋对中温乳化香肠进行真空包装, 结果表明, 质量分数为 1% 的留兰香提取物- β -环糊精-聚丙烯抗菌薄膜具有持久抑菌效果, 可延长香肠货架寿命至 50 d。张臻臻^[42]通过共混挤出吹塑的方法制备了一种线性低密度聚乙烯/改性纳米 ZnO 抗菌膜, 其对大肠杆菌的抗菌率可达 90% 以上。汪敏等^[43]以 SiO_2 负载纳米银颗粒为抗菌剂, 以 PE 为基材, 通过共混改性、挤出造粒、吹膜制备出纳米银 PE 薄膜。当纳米银质量分数为 4% 时, 该抗菌膜可抑制白菜的主要致腐微生物的生长, 可有效降低白菜的腐烂率。曹国洲^[44]将改性纳米银与杂多酸盐抗菌剂进行复配,

并与聚丙烯 (PP) 进行熔融共混, 通过平板硫化机热压成型制得一种 PP 复合抗菌膜。当改性纳米银 (M-Ag) 和季磷盐 (P4-PW) 的质量分数分别为 0.05% 和 0.5% 时, 该抗菌膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率均超过 97%。钟乐等^[45]在聚乙烯膜 (PE) 表面依次涂布丙烯酸树脂阴离子乳液和壳聚糖/柠檬油成膜液, 制备了一种可用于食品包装的抗菌膜。在 4 °C 贮藏条件下, 该抗菌膜与 PE 膜相比可延长猪肉保质期 2 d。然而, 上述抗菌膜中抗菌剂是否会向食品迁移, 迁移量是否会超标, 抗菌膜的抗菌能力是否满足食品包装的实际需求还有待一步研究。

不少研究人员采用流延法/刮膜法制备了多种基于 PLA/壳聚糖的抗菌膜。欧阳锐等^[46]将壳聚糖溶液与 PLA 溶液、肉桂醛、丁香油、甘油按照一定比例共混搅匀, 倒入模具, 在 60 °C 下干燥成膜, 制得一种复合抗菌膜。当该复合抗菌膜中肉桂醛和丁香油的体积比为 1:1 和 2:1 时, 可以延长鸡胸肉的货架期 2~3 d。成淑君等^[47]以肉桂精油、壳聚糖、木薯淀粉等为原料, 采用流延法制备木薯淀粉-壳聚糖-肉桂精油复合膜, 该抗菌膜可延长红提的贮藏期。魏晓奕等^[48]将丁香油添加至菠萝叶纤维-离子液体膜液中, 使用流延法制备抗菌膜, 在 4 °C 条件下将它应用于猪肉包装中, 可延缓猪肉菌落总数的上升时间, 延长猪肉货架期 3~5 d。李洋洋等^[49]以 PLA、聚羟基脂肪酸酯为基材, 使用吸附薄荷精油的硅藻土为抑菌剂, 采用双螺杆挤出机共混后使用流延机制备可降解抗菌膜, 在 4 °C 下包装樱桃, 可有效保持樱桃果实品质, 延长其贮藏期。张健等^[50]通过在壳聚糖溶液中加入石墨烯粉末, 超声处理后刮膜、干燥制得石墨烯/壳聚糖抗菌膜, 该抗菌膜可抑制冷藏猪肉菌落总数的上升, 当石墨烯质量分数为 4% 时, 可延长猪肉货架期 3 d。

静电纺丝和接枝改性也是近年来制备抗菌膜的主要方法。李林建等^[51]以肉桂醛和 PLA 为主要原料, 使用静电纺丝方法制备了一种基于肉桂醛的 PLA 抗菌膜, 并在 4 °C 条件下将它应用于猪肉保鲜包装, 当肉桂醛质量分数为 3% 时, 该抗菌膜可延长猪肉货架期 6 d。林珊等^[52]以 ZnCl_2 水溶液为溶剂, 采用盐酸胍改性氧化纤维素, 制备一种具有抗菌功能的原位接枝纤维素膜, 该纤维素膜可明显抑制大肠杆菌和葡萄球菌生长。然而, 上述抗菌膜制备过程中使用的溶剂是否会存在残留超标, 抗菌膜的力学性能是否满足食品包装要求仍有待进一步探索。

通过对比分析近年来国内外研究成果可知, 国内外科研工作者关于食品包装用抗菌膜的研究大多集中在聚烯烃基材抗菌膜、可降解抗菌膜和可食用抗菌涂膜等研究上。国内外研究成果在抗菌膜的产品种类、制备方法及其在食品防腐保鲜中的应用等方面存在相似之处, 但在具体研究内容和分析方法上, 国内外研究成果之间还存在一些差距。部分国外研究成果

在研究抗菌膜对被包装食品中微生物的影响时,研究的微生物种类相对全面一些。Emiroğlu 等^[38]不仅研究了可食用大豆抗菌薄膜对被包装碎牛肉中菌落总数的影响,还研究了它对碎牛肉中乳酸菌、葡萄球菌属、假单胞菌属、大肠菌群等微生物的影响;而国内研究内容一般主要测试食品中的菌落总数^[48,50]。大多国内科研工作者在研究聚烯烃基材抗菌膜时,侧重于将抗菌剂与聚烯烃母粒混合吹膜后测试其抑菌效果,而部分国外研究成果对聚烯烃基材抗菌膜不仅研究抗菌膜的抑菌性能,还研究了其抗菌剂(如 Zn^{2+})的释放规律^[26]。总体而言,与国外研究成果相比,国内关于食品包装抗菌膜的研究工作起步较晚,尤其在以下几个方面有待进一步深入研究,如抗菌膜对食品中多种微生物的抑制效果,抗菌膜中抗菌剂的释放规律,以及抗菌剂的抑菌机理等。

3 食品包装用抗菌膜今后研究方向

3.1 优化抗菌膜的抑菌效果及作用方式

按照抗菌作用方式可将食品包装用抗菌膜分为直接接触型抗菌膜和气相缓释型抗菌膜。直接接触型抗菌膜所用抑菌剂多为无机型抗菌剂、有机抗菌剂和部分天然抗菌剂(如壳聚糖),气相缓释型抗菌膜多使用植物精油。目前抗菌膜存在的问题在于抗菌膜采用体外抑菌测试法具有一定的抑菌效果,但是在使用抗菌膜包装食品时,对未接触抗菌膜的部位抑菌作用不明显,导致抗菌膜对于延长食品货架期的效果不显著。一些气相缓释型抗菌膜对食品具有熏蒸抑菌效果,对抑制食品中腐败微生物的生长具有较理想的效果。气相缓释抗菌膜也存在一些问题,例如抗菌剂的缓释速率目前无法进行有效调控。在今后食品包装用抗菌膜的研发过程中,应注重提升抗菌膜的抑菌能力,并优化其作用方式,实现抗菌剂的可控释放,既可持久抑菌又不会对食品造成副作用。

3.2 开展食品安全性风险评估

随着人们对食品安全重视程度的提升,食品包装用抗菌膜使用的抗菌剂越来越趋于选用一些安全性较高的抗菌剂。无机抗菌剂中使用较多的金属系抗菌剂和光催化型抗菌剂对人体的安全性值得探究,其添加量的关键限值应更加明确,尤其要对一些新型纳米抗菌剂的安全性进行风险评估。植物精油作为食品包装抗菌膜中常用的一种抗菌剂,它从包装材料中的释放量也需要进行控制和风险评估。在食品包装用抗菌膜的研发过程中,对抗菌剂进行食品安全风险评估至关重要。近年来,国家相关部门颁布了一系列针对食品接触材料的国家标准,GB 4806.1—2016 规范了食品接触材料在食品安全方面的总体要求,GB 4806.7—2016 针对塑料材质食品接触材料的理化指标及添加

剂提出了具体要求,塑料材质食品接触材料所用原辅料必须符合 GB 9685—2016。食品包装用抗菌膜的原辅料及成品是否符合相应国家标准,在目前的研究中容易被忽视,今后需加强这方面的研究。

3.3 加强抗菌膜产业化应用研究

截至目前,国内外一些科研工作者对食品包装用抗菌膜进行了很多研究,但这些研究绝大部分仍处于实验阶段,未见产业化的商品上市。分析其主要原因:食品包装用抗菌膜的抗菌效果目前还未能满足食品包装的要求;抗菌膜在食品安全风险方面的评估工作还未得到深入开展,某些实验成果是否能满足食品安全要求还未可知;抗菌膜产业化生产工艺的探索及生产成本控制还有待研究。今后需要针对特定的食品开发相应的抗菌膜,使其在应用方式上更加实用,同时在食品安全风险方面进行必要的评估,并在生产成本方面进行控制,最终推动食品包装用抗菌膜的产业化。

4 结语

经过近年来的发展,食品包装用抗菌膜的研究取得了长足进步。由于存在技术、成本、安全等方面的问题,目前食品包装用抗菌膜距离产业化应用仍有一段距离,需广大科研工作者从技术上攻克食品包装用抗菌膜抑菌效果不够强、作用方式不够实用等问题,同时要对其使用的抗菌剂和其他原辅料从食品安全角度进行风险评估,并从产业化应用方面不断改进生产工艺、降低生产成本。随着上述问题被逐渐解决,食品包装用抗菌膜将在减少食品损耗、延长食品货架寿命、保障消费者身体健康方面发挥重要作用。

参考文献:

- [1] SHI Ce, ZHAO Xing-chen, YAN Hai-yang, et al. Effect of Tea Tree Oil on Staphylococcus Aureus Growth and Enterotoxin Production[J]. Food Control, 2016, 62: 257-263.
- [2] WU Yu-mei, WANG Zhi-wei, HU Chang-ying, et al. Influence of Factors on Release of Antimicrobials from Antimicrobial Packaging Materials[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(7): 1108-1121.
- [3] MARDER E P, CIESLAK P R, CRONQUIST A B, et al. Incidence and Trends of Infections with Pathogens Transmitted Commonly through Food and the Effect of Increasing Use of Culture-Independent Diagnostic Tests on Surveillance - Foodborne Diseases Active Surveillance Network, 10 US Sites, 2013-2016[J]. MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report, 2017, 66(15):

- 397-403.
- [4] PATRIGNANI F, SIROLI L, SERRAZANETTI D I, et al. Innovative Strategies Based on the Use of Essential Oils and Their Components to Improve Safety, Shelf-Life and Quality of Minimally Processed Fruits and Vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 311-319.
- [5] 孟晓美, 张丽芬, 陈复生, 等. 生物防治机理及其在采后果蔬病害应用中的研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(10): 223-227.
- MENG Xiao-mei, ZHANG Li-fen, CHEN Fu-sheng, et al. Advances in Application of Biological Control in Postharvest Diseases of Fruits and Vegetables[J]. The Food Industry, 2017, 38(10): 223-227.
- [6] 郑贺云, 张翠环, 耿新丽, 等. 果蔬天然保鲜剂研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2018(7): 158-162.
- ZHENG He-yun, ZHANG Cui-huan, GENG Xin-li, et al. Research Progress on Fruit and Vegetable Natural Preservative[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(7): 158-162.
- [7] 陈曦, 卢立新, 丘晓琳, 等. 食品控释抗菌包装膜的控释机理研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(1): 1-7.
- CHEN Xi, LU Li-xin, QIU Xiao-lin, et al. Advances in Mechanism Research on Controlled Release Antimicrobial Food Packaging Films[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(1): 1-7.
- [8] CALO J, CRANDALL P, O'BRYAN C, et al. Essential Oils as Antimicrobials in Food Systems-a Review[J]. Food Control, 2015, 54: 111-119.
- [9] 白露, 李志明, 周成琳, 等. 抗菌剂在食品包装领域的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(10): 72-73.
- BAI Lu, LI Zhi-ming, ZHOU Cheng-lin, et al. Research Progress of Antibacterial Agents in Food Packaging[J]. Farm Products Processing, 2020(10): 72-73.
- [10] AHMAD S A, DAS S S, KHATOON A, et al. Bactericidal Activity of Silver Nanoparticles: A Mechanistic Review[J]. Materials Science for Energy Technologies, 2020, 3: 756-769.
- [11] 张慧书, 刘守新. TiO_2 光催化杀菌机理及应用研究进展[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(17): 5049-5056.
- ZHANG Hui-shu, LIU Shou-xin. Progress of Mechanism and Application of Photocatalytic Bactericidal Effect of TiO_2 [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(17): 5049-5056.
- [12] 何增. 纳米氧化锌和卤胺对棉织物抗菌整理工艺研究[D]. 上海: 东华大学, 2020: 4-5.
- HE Zeng. Study on Antibacterial Finishing of Cotton Fabrics with Nano Zinc Oxide and N-Haloamine[D]. Shanghai: Donghua University, 2020: 4-5.
- [13] 张跃军, 赵晓蕾. 季铵盐杀生剂杀生性能与机理研究进展[J]. 精细化工, 2010, 27(12): 1145-1151.
- ZHANG Yue-jun, ZHAO Xiao-lei. Research Progress in the Biocidal Performance and Mechanism of Quaternary Ammonium Salt Biocide[J]. Fine Chemicals, 2010, 27(12): 1145-1151.
- [14] 梁真真, 白绘宇. 抗菌性聚乙烯醇包装材料的研究进展[J]. 塑料包装, 2019, 29(5): 13-23.
- LIANG Zhen-zhen, BAI Hui-yu. Research Progress on Antibacterial Polyvinyl Alcohol for Packaging[J]. Plastics Packaging, 2019, 29(5): 13-23.
- [15] ABDOLLAHZADEH E, REZAEI M, HOSSEINI H. Antibacterial Activity of Plant Essential Oils and Extracts: The Role of Thyme Essential Oil, Nisin, and Their Combination to Control *Listeria Monocytogenes* Inoculated in Minced Fish Meat[J]. Food Control, 2014, 35(1): 177-183.
- [16] BAYDAR H, SAĞDIÇ O, ÖZKAN G, et al. Antibacterial Activity and Composition of Essential Oils from *Origanum*, *Thymbra* and *Satureja* Species with Commercial Importance in Turkey[J]. Food Control, 2004, 15(3): 169-172.
- [17] YANG Kuan, LIU Ai-ping, HU Ao-xue, et al. Preparation and Characterization of Cinnamon Essential Oil Nanocapsules and Comparison of Volatile Components and Antibacterial Ability of Cinnamon Essential Oil before and after Encapsulation[J]. Food Control, 2020, 123: 107783.
- [18] COSENTINO S, TUBEROSO C I, PISANO B, et al. In-Vitro Antimicrobial Activity and Chemical Composition of Sardinian *Thymus* Essential Oils[J]. Letters in Applied Microbiology, 1999, 29(2): 130-135.
- [19] BURT S. Essential Oils: Their Antibacterial Properties and Potential Applications in Foods—a Review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 94(3): 223-253.
- [20] CUI Hai-ying, ZHANG Cheng-hui, LI Chang-zhu, et al. Antibacterial Mechanism of *Oregano* Essential Oil[J]. Industrial Crops & Products, 2019, 139: 111498.
- [21] ZHANG Yun-bin, LIU Xiao-yu, WANG Yi-fei, et al. Antibacterial Activity and Mechanism of Cinnamon Essential Oil Against *Escherichia Coli* and *Staphylococcus Aureus*[J]. Food Control, 2016, 59: 282-289.
- [22] BARBOSA L N, ALVES F C B, ANDRADE B F M T, et al. Proteomic Analysis and Antibacterial Resistance Mechanisms of *Salmonella Enteritidis* Submitted to the

- Inhibitory Effect of Origanum Vulgare Essential Oil, Thymol and Carvacrol[J]. *Journal of Proteomics*, 2020, 214: 103625.
- [23] 方健. 壳聚糖基膜材料的制备、性能与结构表征[D]. 北京: 北京林业大学, 2013: 1-2.
- FANG Jian. Preparation, Properties and Characterizations of Chitosan-Based Film Materials[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013: 1-2.
- [24] BOSCHETTO D L, LERIN L, CANSIAN R, et al. Preparation and Antimicrobial Activity of Polyethylene Composite Films with Silver Exchanged Zeolite-Y[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 204-206: 210-216.
- [25] ITTIACHEN L, BABU S. Evaluation of Antibacterial Activity of Biosynthesized Silver Nanoparticles Coated Low Density Polyethylene Films[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 64: 1-10.
- [26] ROJAS K, CANALES D, AMIGO N, et al. Effective Antimicrobial Materials Based on Low-Density Polyethylene (LDPE) with Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 172: 173-178.
- [27] SUPPAKUL P, SONNEVELD K, BIGGER S W, et al. Efficacy of Polyethylene-Based Antimicrobial Films Containing Principal Constituents of Basil[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2007, 41(5): 779-788.
- [28] AZLIN-HASIM S, CRUZ-ROMERO M C, MORRIS M A, et al. Effects of a Combination of Antimicrobial Silver Low Density Polyethylene Nanocomposite Films and Modified Atmosphere Packaging on the Shelf Life of Chicken Breast Fillets[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2015, 4: 26-35.
- [29] LOMATE G B, DANDI B, MISHRA S. Development of Antimicrobial LDPE/Cu Nanocomposite Food Packaging Film for Extended Shelf Life of Peda[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 16: 211-219.
- [30] MULLER J, QUESADA A C, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C, et al. Antimicrobial Properties and Release of Cinnamaldehyde in Bilayer Films Based on Polylactic Acid (PLA) and Starch[J]. *European Polymer Journal*, 2017, 96: 316-325.
- [31] SHANKAR S, WANG Long-feng, RHIM J W. Incorporation of Zinc Oxide Nanoparticles Improved the Mechanical, Water Vapor Barrier, UV-Light Barrier, and Antibacterial Properties of PLA-Based Nanocomposite Films[J]. *Materials Science & Engineering C*, 2018, 93: 289-298.
- [32] PANISA S, PETRUNG S, PHILIPPE D, et al. Antimicrobial Film from PLA/NR-Grafted-Modified Chitosan-Chelated-Silver Ions Blend[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2021, 169: 105073.
- [33] LEE J S, CHOI I, HAN J. Mathematical Modeling of Cinnamon (Cinnamomum Verum) Bark Oil Release from Agar/PVA Biocomposite Film for Antimicrobial Food Packaging: The Effects of Temperature and Relative Humidity[J]. *Food Chemistry*, 2021, 363: 130306.
- [34] NASSIMA D, HAFIDA F H, MARINA R, et al. Cellulose Acetate/AgNPs-Organoclay and/or Thymol Nano-Biocomposite Films with Combined Antimicrobial/Antioxidant Properties for Active Food Packaging Use[J]. *International Journal of Biological Macromolecules (Structure, Function and Interactions)*, 2019(121): 508-523.
- [35] ESPITIA P J P, DU Wen xian, DE JESÚS AVENA-BUSTILLOS R, et al. Edible Films from Pectin: Physical-Mechanical and Antimicrobial Properties - a Review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 287-296.
- [36] HAGHIGHI H, LEO R, BEDIN E, et al. Comparative Analysis of Blend and Bilayer Films Based on Chitosan and Gelatin Enriched with LAE (Lauroyl Arginate Ethyl) with Antimicrobial Activity for Food Packaging Applications[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 19: 31-39.
- [37] AGARWAL S, HOQUE M, BANDARA N, et al. Synthesis and Characterization of Tamarind Kernel Powder-Based Antimicrobial Edible Films Loaded with Geraniol[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 26: 100562.
- [38] EMIROĞLU Z K, YEMİŞ G P, COŞKUN B K, et al. Antimicrobial Activity of Soy Edible Films Incorporated with Thyme and Oregano Essential Oils on Fresh Ground Beef Patties[J]. *Meat Science*, 2010, 86(2): 283-288.
- [39] ZAREIE Z, TABATABAEI YAZDI F, MORTAZAVI S A. Development and Characterization of Antioxidant and Antimicrobial Edible Films Based on Chitosan and Gamma-Aminobutyric Acid-Rich Fermented Soy Protein[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 244: 116491.
- [40] 薄艳娜, 林勤保, 苏启枝, 等. 纳米银-聚乙烯复合薄膜的制备及表征[J]. *包装工程*, 2017, 38(19): 8-13.
- BO Yan-na, LIN Qin-bao, SU Qi-zhi, et al. Preparation and Characterization of Nanosilver-Polyethylene Composite Films[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(19): 8-13.
- [41] 贾晓云, 张顺亮, 刘文营, 等. 留兰香环糊精抑菌缓释功能改性对聚丙烯基薄膜包装性能及乳化香肠货架期的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 241-246.

- JIA Xiao-yun, ZHANG Shun-liang, LIU Wen-ying, et al. Effect of Incorporation of Spearmint Extract Micro-encapsulated with B-Cyclodextrin on Properties of Polypropylene Packaging Films and Emulsion Sausage Shelf Life[J]. Food Science, 2018, 39(11): 241-246.
- [42] 张臻臻. LLDPE/Nano-ZnO/CCA 纳米复合强抗菌薄膜的制备及表征[D]. 郑州: 郑州大学, 2017: 15-36.
- ZHANG Zhen-zhen. Study on Preparation and Properties of the Strong Antibacterial LLDPE/Nano-ZnO/CCA Nanocomposites Films[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017: 15-36.
- [43] 汪敏, 赵永富, 侯喜林, 等. 纳米银抗菌膜对白菜的保鲜效果[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 204-206.
- WANG Min, ZHAO Yong-fu, HOU Xi-lin, et al. The Fresh-Keeping Effect of Nano-Silver Antibacterial Film on Cabbage[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 204-206.
- [44] 曹国洲. 海产品包装用纳米改性抗菌膜的制备、表征及其安全性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019: 44-58.
- CAO Guo-zhou. Preparation, Characterization and Safety of Nano-Modified Antibacterial Film for Marine Product Packaging[D]. Ningbo: Ningbo University, 2019: 44-58.
- [45] 钟乐, 曾绮颖, 肖乃玉, 等. 聚乙烯/壳聚糖-柠檬精油抗菌膜的制备及应用[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 58-66.
- ZHONG Le, ZENG Qi-ying, XIAO Nai-yu, et al. Preparation and Application of Polyethylene/Chitosan-Lemon Essential Oil Antibacterial Film[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 58-66.
- [46] 欧阳锐, 张莺莺, 王骏杰, 等. 基于肉桂醛-丁香油的壳聚糖/聚乳酸抗菌膜的应用研究[J]. 福建师大福清分校学报, 2020(5): 21-27.
- OUYANG Rui, ZHANG Ying-ying, WANG Jun-jie, et al. Antibacterial Potential of CS/PLA Film Loaded with Cinnamaldehyde and Clove Oil[J]. Journal of Fuqing Branch of Fujian Normal University, 2020(5): 21-27.
- [47] 成淑君, 李秋铮, 曾瑶英, 等. 肉桂精油抗菌膜的制备及应用[J]. 食品工业, 2020, 41(6): 19-23.
- CHENG Shu-jun, LI Qiu-zheng, ZENG Yao-ying, et al. Preparation and Application of Antibacterial Film of Cinnamon Essential Oil[J]. The Food Industry, 2020, 41(6): 19-23.
- [48] 魏晓奕, 常刚, 崔丽虹, 等. 丁香油/菠萝叶纤维抗菌复合膜在猪肉保鲜中的应用[J]. 食品工业, 2018, 39(12): 198-200.
- WEI Xiao-yi, CHANG Gang, CUI Li-hong, et al. Preservation Performance of Clove Oil/Pineapple Leaf Fiber Composite Antibacterial Membrane on Pork[J]. The Food Industry, 2018, 39(12): 198-200.
- [49] 李洋洋, 宋文龙, 郜海燕, 等. 聚乳酸活性抗菌薄膜的性能及其对樱桃保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 216-222.
- LI Yang-yang, SONG Wen-long, GAO Hai-yan, et al. Properties of Antimicrobial Polylactic Acid-Based Film and Its Effect on Cherry Quality Preservation[J]. Food Science, 2020, 41(17): 216-222.
- [50] 张健, 刘园园, 周侗, 等. 石墨烯/壳聚糖抗菌膜的制备及其保鲜性能评价[J]. 造纸科学与技术, 2018, 37(3): 42-45.
- ZHANG Jian, LIU Yuan-yuan, ZHOU Ti, et al. Graphene/Chitosan Antibacterial Membrane: Preparation and Fresh Keeping Performance[J]. Paper Science & Technology, 2018, 37(3): 42-45.
- [51] 李林建. 肉桂醛/聚乳酸纳米纤维抗菌膜的制备[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014: 23-50.
- LI Lin-jian. Preparation of Cinnamaldehyde/Poly Lactic Acid Nanofiber Antimicrobial Membrane[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014: 23-50.
- [52] 林珊. 纤维素抗菌膜的制备及其深度水处理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 42-55.
- LIN Shan. Preparation of Antibacterial Cellulose Membranes and Their Application in the Depth Treatment of Water[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013: 42-55.

责任编辑: 曾钰婵