

## 抗菌活性包装膜及其控释技术的研究进展

唐智鹏<sup>1,2</sup>, 陈晨伟<sup>1,2</sup>, 谢晶<sup>1,2</sup>

(1.上海海洋大学, 上海 201306; 2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:** **目的** 为控释型抗菌活性包装膜在食品工业中的应用与开发研究提供基础。**方法** 综述抗菌活性包装膜及其结合控释技术的国内外研究进展, 同时总结抗菌活性包装膜在果蔬类、动物源类食品中的应用, 并对控释型抗菌活性包装膜未来的发展趋势进行展望。**结果** 抗菌活性膜与控释技术相结合的研究还处于起步阶段, 其抗菌剂的选择、安全性、物理性质、释放规律等问题还需深入研究。**结论** 国内外抗菌薄膜的实验室研究阶段基本成熟, 但是在结合控释技术的应用方面还有待进一步推广, 因此, 开发安全、高效的控释型抗菌活性包装膜和推广食品包装应用是食品包装技术的研究方向。

**关键词:** 抗菌活性; 包装膜; 涂层型; 固载型; 直接加入型; 控释技术; 应用进展

中图分类号: TB484.6; TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)05-0099-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.019

## Research Progress of Antibacterial Active Packaging Film and Its Controlled Release Technology

TANG Zhi-peng<sup>1,2</sup>, CHEN Chen-wei<sup>1,2</sup>, XIE Jing<sup>1,2</sup>

(1.Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.China Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide basis for the development & research of controlled release-type antibacterial active packaging film and its application in food industry. The research progress of antibacterial active packaging film and its integrated controlled release technology at home and abroad was summarized. The applications of antibacterial active packaging films in fruit, vegetable food and animal food were also summarized, and the future development trend of the controlled release-type antibacterial active packaging film was prospected. The study on the combination of antibacterial active film and controlled release technology was still in the starting phase, and the selection of antibacterial agent, safety, physical properties, release rules and other issues needed to be further studied. Laboratory research phase of antibacterial film at home and abroad is basically mature, but the application of incorporation of controlled release technology is to be further promoted. Therefore, the development of safe and highly effective controlled release-type antibacterial active packaging film and the promotion in food packaging applications are the future research direction of food packaging technology.

**KEY WORDS:** antibacterial active; packaging film; coated type; immobilized type; direct addition type; controlled release technology; application progress

随着人们对环境污染和食品卫生安全关注程度的日益提高, 为了更有效地延长食品货架期、保证食

品安全以及减少对环境的污染, 各种活性包装技术应运而生。根据欧盟 ACTIPAK 项目(编号 FAIR-CT98-

收稿日期: 2017-03-17

基金项目: 2016 年上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2016)第 1-1 号); 上海市科委平台能力建设项目(16 DZ2280300); 上海海洋大学科技发展专项(A2-0203-00-100218)

作者简介: 唐智鹏(1993—), 男, 上海海洋大学硕士生, 主攻食品包装技术。

通信作者: 谢晶(1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授, 主要研究方向为食品贮藏保鲜和食品包装技术。

4170)可知,活性包装是指改变食品保存条件而延长货架期或改善食品安全与感官品质的包装技术<sup>[1]</sup>。目前活性包装技术主要有吸收型、释放型、固载型和其他类型。吸收型可以去除包装中的氧气、二氧化碳、乙烯、过量水分、腐败产物等;释放型可以主动地释放某些化合物到包装食品内部顶隙或食品表面,如二氧化碳、抗氧化剂和抗菌剂等;固载型可以将活性物质以离子键和共价键的形式固定在包装基材的表面,通过改变薄膜表面特性来避免活性物质的释放;其他类型有自热系统、自冷系统等<sup>[2]</sup>。

微生物是导致食品贮藏过程中腐败变质的重要因素之一。随着食品中有害微生物的生长繁殖,会产生大量的致病菌,从而导致食品的腐败变质。如何控制食品中的微生物繁殖,在保证食品品质、延长食品货架期上起到关键作用。食品包装在食品贮藏过程中为抑制食品中有害微生物的生长繁殖、延缓食品品质变化、延长食品货架期发挥着重要作用。抗菌活性包装薄膜是目前国内外食品包装领域的研究热点之一,它是将抗菌活性物质通过不同方式加入到不同基材的包装薄膜中,制备得到具有抗菌活性的包装薄膜。相比于直接向食品中添加抗菌剂,使用抗菌膜包装食品更加安全卫生,对人体更加健康<sup>[3]</sup>。

控释包装是控制活性物质从基材包装材料中可控的合适速率释放出来的包装,达到保证食品品质与安全、延长食品货架期寿命的作用<sup>[4]</sup>。将抗菌活性包装薄膜与控释技术结合的控释包装已成为食品包装领域的研究热点之一,文中综述抗菌活性包装膜及其控释技术的国内外研究进展,同时总结抗菌活性包装膜在食品中的应用,并对其未来发展趋势进行展望。

## 1 抗菌活性包装膜的类型

目前在抗菌活性包装薄膜研究中加入的抗菌剂较多集中于无机抗菌剂、有机抗菌剂和天然抗菌剂<sup>[5]</sup>。无机抗菌剂如银、铜、锌等纳米金属材料,这些金属离子有着与细菌或霉菌的活性酶中心强有力的结合能力,使细菌致死,而具有抗菌能力;有机抗菌剂如香草醛、季铵盐、酚类等物质,其作用于细胞壁、细胞膜系统或生化反应酶等,使细菌致死,而具有抗菌能力;天然抗菌剂如甲壳素、精油类等,这些活性物质作用于细胞壁等,使细菌致死,而具有抗菌性能。随着环境问题越来越受人们关注,抗菌活性包装材料的研究不仅集中在常用的聚乙烯、聚丙烯、乙烯/乙烯醇共聚物(EVOH),还逐渐聚焦于聚乳酸、聚乙烯醇、聚羟基脂肪酸酯等可降解材料。目前抗菌活性包装膜主要有涂布型薄膜、固载型薄膜和直接加入型薄膜,以上都可分别通过喷涂、溶液流延、挤出吹塑、

挤出流延等方法制备得到。

### 1.1 涂布型薄膜

涂布工艺是制备活性抗菌包装的一个重要方式。一般通过将抗菌剂直接喷涂在食品表面或者直接把食品浸泡在抗菌剂中以延长货架期,但是以上2种方法中抗菌剂与食品均会产生直接接触,会影响食品的品质、风味、营养价值甚至安全性。由此,可以将抗菌剂涂布在包装薄膜基材上制成抗菌包装膜,若这种包装膜能够向食品持续缓慢释放抗菌活性物质,就可以长时间地保持内部食品需要的抗菌剂浓度,以延长食品的货架期<sup>[6]</sup>。

Mulla<sup>[7]</sup>等将线性低密度聚乙烯(LLDPE)先通过铬酸处理进行表面改性,接着在其表面涂布丁香精油,制成抗菌PE膜,其透光率相对于纯PE膜降低了78.06%,丁香精油涂层显著改善了薄膜的透光性,提高了其紫外线阻隔性能,且对沙门氏菌和单增李斯特菌有显著的抑制作用。崔珊珊<sup>[8]</sup>等将乳酸链球菌素连同聚糖混合后涂布在聚乙烯薄膜表面,研究表明该薄膜具有优异的抗菌性能。除了以塑料薄膜为基材外,也有研究将活性物质涂布在纸张表面制备得到涂布型纸膜。Battisti<sup>[9]</sup>等以明胶为成膜基材并向其中加入柠檬酸,然后将此共混胶液涂布在纸上制成抗菌纸膜,研究表明,用该纸膜包装牛肉能够有效地抑制活菌数的增长。洪英<sup>[10]</sup>等将羧甲基壳聚糖纳米颗粒溶于水中,制备成水溶液后涂布在纸张表面,制成抗菌纸,研究表明,随着羧甲基壳聚糖溶液浓度的升高,抗菌纸的环压强度、耐破度及撕裂度随着涂布纳米羧甲基壳聚糖浓度的增加均有所增加,机械强度方面得到改善,且有较好的抑菌性能。

抗菌涂布包装技术因其操作简单,能有效地抑制食品表面微生物的生长繁殖而逐渐受到研究者的广泛关注,为食品包装贮藏提供了新的方向,但一些制成的抗菌涂布型包装膜存在着力学性能较差的短板,同时在制备包装膜时也需考虑选择合适的包装基材。

### 1.2 固载型薄膜

固载型薄膜主要是将抗菌活性物质以离子键和共价键的形式固定在包装基材中。在固载型薄膜研究中,Galet<sup>[11]</sup>等将溶菌酶以共价键的形式固定在EVOH中制成抗菌活性薄膜。沈海民<sup>[12]</sup>等主要利用 $\beta$ -环糊精对抗菌剂进行包埋,利用 $\beta$ -环糊精优异的结构特征和物理化学性质,与抗菌活性物质形成特殊的包络物,将其包埋固载在基材中。

国内外学者对固载型薄膜的研究较少,如将活性物质固定在薄膜上,但还是会有极少量的活性物质释放。另外,固载型薄膜在食品包装中的应用没有释放型薄膜广泛,可能是因为将活性物质固载于薄膜表

面, 活性物质的释放性能受到极大的抑制, 不能够全面地作用于细菌感染部位, 不能够很好地延长食品的货架期。在包装食品的时效性、抑菌性能等方面, 固载型薄膜的表现较为逊色。在今后的研究中, 对固载型薄膜的持续抑菌性能、抗菌活性物质释放可能性的研究还需更广泛、深入的研究。

### 1.3 直接加入型薄膜

直接加入型就是将抗菌剂直接混入聚合物树脂中, 通过共混挤出成型或者溶液流延制成的活性包装膜, 然后通过抗菌活性物质从复合膜中的迁移和释放来达到抑制食品中微生物生长繁殖的目的。Morelli<sup>[13]</sup>等通过溶液流延法将苦配巴油添加到聚乳酸 (PLA) 薄膜中, 通过抗菌试验验证了对枯草芽孢杆菌的抑制作用, 并且抗菌性能随着苦配巴油含量的增加而增加。Avila-Sosa<sup>[14]</sup>等制备得到含有肉桂精油、牛至精油和柠檬香茅精油的壳聚糖薄膜, 研究表明该薄膜对黑曲霉、子囊菌表现出很好的抑制效果。邓靖<sup>[15]</sup>等将丁香精油/ $\beta$ -CD 包合物作为活性成分直接加入 PVA 基材中, 流延制备得到具有抗霉菌性能的活性包装膜, 且当包合物的质量大于等于 PVA 干质量的 10% 时, 活性包装膜可以达到 0 级抗霉菌标准。大量研究表明, 含有精油类抗菌活性物质的活性包装薄膜具有较好的抑菌能力, 但直接将精油类抗菌活性物质与薄膜基材共混流延成膜时, 因精油类活性物质挥发, 仅得到较少使用, 薄膜气味和成膜后是否呈现油性表面是在今后的研究中值得关注的问题<sup>[16-17]</sup>。

Beigmohammadi<sup>[18]</sup>等通过挤出吹塑法制备得到含纳米铜离子的低密度聚乙烯 (LDPE) 薄膜, 该薄膜对大肠杆菌有良好的抑制作用。Liu<sup>[19]</sup>等研究了不同类型纳米蒙脱土对聚乙烯醇 (PVA) 薄膜性能的影响, 研究表明, 相对于纯 PVA 薄膜, 含纳米蒙脱土 PVA 薄膜的水蒸气阻隔能力得到了改善, 并降低了其溶解性和溶胀比。通过抗菌试验表明, 其中具有季铵基团类型的纳米蒙脱土 PVA 薄膜能够很好地抑制革兰氏阳性菌 (单增李斯特菌和金黄色葡萄球菌)。

通常, 将纳米复合材料掺入聚合物, 由于纳米物质均匀分散在主体聚合物中, 而形成超高界面相互作用力和离子键, 在一定程度上能改善其整体的机械强度。在选用纳米材料时, 一定要考虑是否会与聚合物基质相冲突, 如纳米材料为疏水颗粒, 而基质是亲水性的, 复合后会导致分散不完全, 致使机械强度的降低<sup>[20-21]</sup>。在今后的研究中, 应当深入地研究影响复合膜感官、机械强度、抗菌性等多方面的因素。

## 2 控释技术的研究

控释技术是指在预定时间内控制某种活性物质的释放速率, 并在某种体系内维持活性物质的质量分

数。利用控释技术可以将抗菌活性物质缓慢地从复合食品包装膜中释放到食品, 从而长时间地保持食品内部所需抗菌剂的浓度。对于食品活性包装膜中活性物质释放速率的控制, 现有研究表明, 可以通过共混、多层复合、包埋等方法控制活性物质的释放速率。

由天然高分子材料共混制得的薄膜能够有效地改善整个薄膜体系中活性物质的释放性能, 张林<sup>[22]</sup>等将壳聚糖和纤维素共混制得薄膜, 通过两者间较好的交联性能有效地改善该薄膜的释放性能。Stroescu<sup>[23]</sup>等将香草醛、聚乙烯醇和细菌纤维共混制得薄膜, 使用伪一阶模型、菲克扩散定律研究了香草醛的释放机理, 研究表明, 该共混薄膜通过控制聚乙烯醇和细菌纤维的共混比例能实现对香草醛的控制释放。Buonocore<sup>[24]</sup>等将溶菌酶和聚乙烯醇共混为抗菌内层, 聚乙烯醇为涂布外层, 研究表明, 通过多层复合结构可以控制溶菌酶从 PVA 中的释放速率。段华伟<sup>[25]</sup>等制成由外至内的 PE/EVOH/PE/EVOH/纳米氧化镁 PE 抗菌层复合膜, 研究表明该多层复合结构能有效控制活性物质的释放, 且对大肠杆菌杀灭率可达 99.99%。将活性物质进行微囊包埋是实现控释的另一手段。Guarda<sup>[26]</sup>等以阿拉伯胶为囊材制备百里酚和香芹酚微囊包埋于聚丙烯薄膜, 研究表明该方法有效降低了活性物质的释放速率, 且薄膜具有良好的抗菌性能。

除了以上方法, 也可以通过控制基质组分、外界处理压力、环境温度、pH 值等因素来达到控释的目的。Lantano<sup>[27]</sup>等首先制备得到以四乙氧基硅烷和聚乙烯醇为基材的含游霉素的溶胶, 再将其涂布于聚乳酸表面制备得到具有抗菌性能的聚乳酸薄膜。研究表明, 通过调整四乙氧基硅烷和聚乙烯醇的比例, 可以实现对游霉素释放速率的控制, 且随着聚乙烯醇质量分数的增加, 游霉素的释放速率增大。李学红<sup>[28]</sup>等在包装材料中加入环糊精, 以此来控制抗菌剂的释放速率, 且加入环糊精后有明显的缓释效果。Lian<sup>[29]</sup>等在聚乙烯醇/壳聚糖复合膜的制备过程中借助高静水压 (HHP) 处理向包装基材中加入纳米  $\text{TiO}_2$ , 从而制成经 HHP 处理的复合膜。研究表明, 通过控制 HHP 的处理压力, 可以实现对  $\text{TiO}_2$  释放速率的控制, 未经 HHP 处理和压力过高会导致释放速率增大, 维持 HHP 处理压力在 400 MPa 左右能够更好地减缓  $\text{TiO}_2$  的释放速率。Kanatt<sup>[30]</sup>等在壳聚糖/聚乙烯醇复合膜中掺入薄荷提取物或者石榴皮提取物, 从而制成具有抗菌性能的复合膜, 通过控制环境温度, 可以实现对活性物质释放速率的控制。Li<sup>[31]</sup>等也通过控制环境温度, 以此来控制银离子从聚乙烯/Ag/ $\text{TiO}_2$  复合膜中的释放速率。研究表明, 随着环境温度的升高, 活性物质从膜中释放到食品模拟液中的速率也随之增高。Wang<sup>[32]</sup>等向壳聚糖/聚乙烯醇中加入乳链菌肽

(Nisin), 制成具有高度抗菌能力的食品包装膜。研究表明, 通过控制 pH 值可以实现对活性物质释放速率的控制, 在低于等电点的 pH 值下, 带正电荷的 Nisin 会随着 pH 值的降低而增加在水中的释放速率。

目前, 对于抗菌活性包装膜控释技术的研究仍处于起步阶段, 但因其能够通过控制某一或某几个因素达到缓慢释放活性物质、延长食品货架期的目的, 而受到研究机构和产业界的关注。在此基础上, 对食品与活性材料之间可能存在的相互作用及食品包装后的工艺处理, 如高压、微波加热、辐照等, 是否会对控释系统的效能产生一定的影响也是目前研究的主要方向之一。

### 3 抗菌包装薄膜的应用

#### 3.1 在果蔬食品中的应用

果蔬食品由于水分蒸腾作用和有害微生物侵害等因素, 不利于果蔬品质保持, 适当的活性包装可以通过改善果蔬周围的气体环境、减少有害微生物的数量、减缓酶促褐变等来减缓果蔬品质的变化, 延长其货架期。胡晓亮<sup>[33]</sup>等用壳聚糖薄膜包装苹果、香蕉等水果, 研究表明, 使用活性薄膜包装水果能有效降低腐败率、失水率和抑制病原菌的生长。Loryuenyong<sup>[34]</sup>等将氧化石墨烯和聚乙烯醇制成抗菌薄膜, 并用其包装香蕉, 研究表明, 在 15 d 的香蕉贮藏时间里, 未包装和用 PVA 膜包装的香蕉损失了更高的质量, 且香蕉表皮已严重变黑和出现白色霉斑, 而用活性薄膜包装的香蕉只是呈现深棕色, 未出现霉斑。韩永生<sup>[35]</sup>等利用银离子和锌离子制备抗菌沸石, 并通过填充改性的方法与 LDPE 共混制备得到抗菌薄膜, 用其包装黄瓜和番茄。结果表明, 贮藏 15 d 后, 抗菌薄膜包装的番茄和黄瓜的质量损失率、总酸含量和维生素 C 含量的变化均比纯 LDPE 膜包装的小, 且腐烂率更低。邓雯瑾<sup>[36]</sup>等将百里香精油涂布在聚乙烯醇表面制成活性薄膜, 用其包装鲜切生菜, 研究表明, 由于含百里香精油抗菌薄膜在贮藏期间内缓释出抑菌物质, 用活性薄膜包装的生菜中的总活菌数远低于用普通聚乙烯膜包装的生菜, 同时该活性复合薄膜能有效抑制鲜切生菜中荧光假单胞菌的生长。

#### 3.2 在动物源类食品中的应用

随着人们对肉类食品安全意识的不断提高, 利用天然活性物质与生物技术包装肉质食品也是研究热点之一<sup>[37]</sup>。Muppalla<sup>[38]</sup>等将丁香精油、羧甲基纤维素和聚乙烯醇溶液流延成膜, 将该薄膜应用于鸡肉包装, 在冷藏温度 4℃下贮藏 4 d 后, 鸡肉中活菌数显著低于纯 PVA 膜包装的鸡肉, 且最终的货架期延长了 8 d。Han<sup>[39]</sup>等研究了由聚乙烯醇与大黄提取物和

肉桂精油共混再涂布在聚丙烯薄膜上而制成的复合膜在保持新鲜牛肉质量方面的效用, 研究表明, 这种膜包装的牛肉贮藏 8 d 后, 总活菌数才达到 5.33 lg(CFU/g), 而与对照组的 7.21 lg(CFU/g)相比, 使用抗菌复合膜处理后能保持更好的质量。肖乃玉<sup>[40]</sup>等用阿魏酸和胶原蛋白制成抗菌薄膜, 并用其包装腊肠, 研究表明该方法能有效地抑制微生物的侵害, 延缓了食品成分的化学变化, 将腊肠的货架期延长了 9 d。

### 4 结语

抗菌活性包装和控释技术相结合是活性包装研究的发展趋势。由于食品在生产、贮藏、运输和销售过程中的多样性, 为了满足广大消费者对各式食品新鲜、安全、卫生等方面的要求, 控释型抗菌活性食品包装膜的发展前景十分可观。可降解生物或生物基材料掺杂天然活性剂是未来控释系统的发展趋势, 而天然可降解系统的复杂性和不稳定性是目前的主要研究内容, 并且对于控释型抗菌活性包装膜的研究仍处于初级阶段, 有许多问题仍需深入研究。具体包括: 抗菌活性物质的选择十分重要, 关于抗菌剂的安全性问题以及添加进包装材料后抗菌剂的释放是否会对食品造成危害的风险评估研究还比较缺乏; 当将抗菌剂添加进包装材料后, 会对整体的物理性质, 如机械强度、拉伸强度、膜的表面结构等造成一定的影响, 需要在保证其抗菌性的前提下不断改进; 抗菌活性物质从活性包装膜中释放出来的动力学模型也需要进一步研究与讨论, 从而实现抗菌性的精确控制。

活性包装是食品包装技术的发展方向之一, 发展前景十分广泛。控释型抗菌活性包装薄膜作为一种活性包装技术, 未来研究将呈现如下趋势: 用天然、高效、安全且能与薄膜基材良好相容的抗菌活性物质制备抗菌活性包装材料; 通过研究活性物质的释放规律、环境影响因素、加工处理方法等, 能够控制抗菌活性物质在薄膜中的释放速率, 从而延长抗菌活性薄膜的持续抑菌时间; 越来越多具有优异抑菌性能、物理性能的可控释活性包装薄膜被运用到植物源类、动物源类食品包装中, 极大地延长了食品的货架期, 对食品的营养价值和商品价值起到很好的保护作用。

#### 参考文献:

- [1] LA S A. Development and Application of Antimicrobial Food Packaging[D]. Napoli: University of Naples Federico II, 2008.
- [2] 黄志刚, 刘凯, 刘科. 食品包装新技术与食品安全[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 161—166.  
HUANG Zhi-gang, LIU Kai, LIU Ke. New Technology and Food Safety of Food Packaging[J]. Packaging En-

- gineering, 2014, 35(13): 161—166.
- [3] 王晓岑, 井晶, 于艳燕, 等. 植物抗菌剂抑菌机理及其在食品防腐中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2013(6): 152—156.  
WANG Xiao-cen, JING Jing, YU Yan-yan, et al. Plant Antibacterial Mechanism and Its Application in Food Preserving[J]. Food and Fermentation Industry, 2013(6): 152—156.
- [4] BYAMANDA L, KAREN M S, DAVID Z, et al. Advancing Controlled Release Packaging through Smart Blending[J]. Packaging Technology and Science, 2005 (18): 77—87.
- [5] 吉向飞, 李玉平, 杨柳青, 等. 抗菌剂及抗菌材料的发展和应⤵用[J]. 太原理工大学学报, 2003(1): 11—15.  
JI Xiang-fei, LI Yu-ping, YANG Liu-qing, et al. Preparation and Application of Antibacterial and Antibacterial Materials[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003(1): 11—15.
- [6] TEERAKARN A, HIRT D E, ACTON J C, et al. Nisin Diffusion in Protein Films: Effects of Film Type and Temperature[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(8): 3019—3025.
- [7] MULLA M, AHMED J, AL-ATTAR H, et al. Antimicrobial Efficacy of Clove Essential Oil Infused into Chemically Modified LLDPE Film For Chicken Meat Packaging[J]. Food Control, 2017, 73: 663—671.
- [8] 崔珊珊, 卢立新, 刘志刚. 温度对抗菌涂层薄膜中 Nisin 扩散性能的影响[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 8—9.  
CUI Shan-shan, LU Li-xin, LIU Zhi-gang. Effect of Temperature on Diffusion Properties of Nisin in Antibacterial Coatings[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 8—9.
- [9] BATTISTI R, FRONZA N, et al. Gelatin-coated Paper with Antimicrobial and Antioxidant Effect for Beef Packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 11: 115—124.
- [10] 洪英, 钟泽辉, 郑朝位, 等. 纳米羧甲基壳聚糖抗菌纸的制备及其力学性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 50—53.  
HONG Ying, ZHONG Ze-hui, ZHENG Chao-wei, et al. Preparation and Mechanical Properties of Nanocarboxymethyl Chitosan Antibacterial Paper[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 50—53.
- [11] GALET V, TALBERT J N, MUNOZ P, et al. Covalent Immobilization of Lysozyme on Ethylene Vinyl Alcohol Films for Nonmigrating Antimicrobial Packaging Applications[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(27): 6720—6727.
- [12] 沈海民, 纪红兵, 武宏科, 等.  $\beta$ -环糊精的固载及其应用最新研究进展[J]. 有机化学, 2014(8): 1549—1572.  
SHEN Hai-min, JI Hong-bing, WU Hong-ke, et al. Recent Advances in the Immobilization of  $\beta$ -cyclodextrin and Its Application[J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2014(8): 1549—1572.
- [13] MORELLI C L, MAHROUS M, BELGACEM M N, et al. Natural Copaiba Oil as Antibacterial Agent for Bio-based Active Packaging[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 70: 134—141.
- [14] AVILA-SOSA R, PALOU E, JIMENEZ M T, et al. Antifungal Activity by Vapor Contact of Essential Oils Added to Amaranth, Chitosan, or Starch Edible Films [J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 153(1): 66—72.
- [15] 邓靖, 李文, 郝喜海, 等. 基于丁香精油/ $\beta$ -CD 包合物的 PVA 活性包装膜制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2014(9): 58—60.  
DENG Jing, LI Wen, HAO Xi-hai, et al. Preparation and Properties of PVA Active Packaging Film Based on Clove Essential Oil/ $\beta$ -CD Inclusion Compound[J]. New Chemical Materials, 2014(9): 58—60.
- [16] 陈亮, 赵瑞鹏, 沈卫华, 等. 壳聚糖-混合精油薄膜的制备及对生猪肉的保鲜效果研究[J]. 食品工业, 2013(8): 8—10.  
CHEN Liang, ZHAO Rui-peng, SHEN Wei-hua, et al. Preparation of Chitosan-mixed Essential Oil Film and Its Fresh-keeping Effect on Raw Pork[J]. Food Industry, 2013(8): 8—10.
- [17] 王丹, 周才琼. 植物精油在可食性抗菌膜中的应用[J]. 食品工业科技, 2014(1): 349—354.  
WANG Dan, ZHOU Cai-qiong. Application of Plant Essential Oil in Edible Antibacterial Film[J]. Food Industry Science and Technology, 2014(1): 349—354.
- [18] BEIGMOHAMMADI F, PEIGHAMBARDOUST S H, HESARI J, et al. Antibacterial Properties of LDPE Nanocomposite Films in Packaging of UF Cheese[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 106—111.
- [19] LIU Gui-chao, SONG Ye, WANG Jia-mei, et al. Effect of Nanoclay Type on the Physical and Antimicrobial Properties of PVOH-based Nanocomposite Films[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57: 562—568.
- [20] SINHA RAY S, BOUSMINA M. Biodegradable Polymers and Their Layered Silicate Nanocomposites: in Greening the 21st Century Materials World[J]. Progress in Materials Science, 2005, 50(8): 962—1079.
- [21] RHIM J W. Effect of Clay Contents on Mechanical and Water Vapor Barrier Properties of Agar-based Nanocomposite Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86 (2): 691—699.
- [22] 张林, 杨立邦, 隋淑英. 抗菌纤维素/壳聚糖衍生物复合共混膜的制备及性能研究[J]. 印染助剂, 2010, 27(6): 20—22.  
ZHANG Lin, YANG Li-bang, SUI Shu-ying. Preparation and Properties of Antibacterial Cellulose/Chitosan Derivative Composite Blends[J]. Auxiliaries, 2010, 27(6): 20—22.
- [23] STROESCU M, STOICA-GUZUN A, JIPA I M. Vanillin Release from Poly (Vinyl Alcohol)-bacterial Cellu-

- lose Mono and Multilayer Films[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114: 153—157.
- [24] BUONOCORE G G, CONTE A, CORBO M R, et al. Mono-and Multilayer Active Films Containing Lysozyme as Antimicrobial Agent[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2005, 6: 459—464.
- [25] 段华伟, 汤树海. 食品包装用高阻隔抗菌薄膜的制备及性能分析[J]. *印刷技术*, 2015(18): 46—48.  
DUAN Hua-wei, TANG Shu-hai. Preparation and Performance Analysis of High Barrier Antimicrobial Film for Food Packaging[J]. *Printing Technology*, 2015(18): 46—48.
- [26] GUARDA A, JAVIERA F, RUBILAR, et al. The Antimicrobial Activity of Microencapsulated Thymol and Carvacrol[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 146: 144—150.
- [27] LANTANO C, ALFIERI I, CAVAZZA A, et al. Natamycin Based Sol-gel Antimicrobial Coatings on Polylactic Acid Films for Food Packaging[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165: 342—347.
- [28] 李学红. 环糊精在抗菌食品包装中的基础应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.  
LI Xue-hong. Basic Application Research of Cyclodextrin Used in Antimicrobial Food Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.
- [29] LIAN Zi-xuan, ZHANG Yi-feng, ZHAO Yan-yun. Nano-TiO<sub>2</sub> Particles and High Hydrostatic Pressure Treatment for Improving Functionality of Polyvinyl Alcohol and Chitosan Composite Films and Nano-TiO<sub>2</sub> Migration from Film Matrix in Food Simulants[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 33: 145—153.
- [30] KANATT S R, RAO M S, CHAWLA S P, et al. Active Chitosan-polyvinyl Alcohol Films with Natural Extracts[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29: 290—297.
- [31] LI Li, ZHAO Chan-juan, ZHANG Ya-dong, et al. Effect of Stable Antimicrobial Nano-silver Packaging on Inhibiting Mildew and in Storage of Rice[J]. *Food Chemistry*, 2017, 215: 477—482.
- [32] WANG Hua-lin, ZHANG Ru, ZHANG Heng, et al. Kinetics and Functional Effectiveness of Nisin Loaded Antimicrobial Packaging Film Based on Chitosan/Poly (Vinyl Alcohol)[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 127: 64—71.
- [33] 胡晓亮, 周国燕. 壳聚糖及其衍生物在果蔬贮藏保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2011(3): 146—150.  
HU Xiao-liang, ZHOU Guo-yan. Application of Chitosan and Its Derivatives in Preservation of Fruits and Vegetables[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2011(3): 146—150.
- [34] LORYUENYONG B V, SAEWONG C, ARANCHAIYA C, et al. The Improvement in Mechanical and Barrier Properties of Poly (Vinyl Alcohol)/Graphene Oxide Packaging Films[J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28: 939—947.
- [35] 韩永生, 孙耀强, 高留意, 等. 抗菌保鲜膜的研究与应用[J]. *食品工业科技*, 2005(4): 146—147.  
HAN Yong-sheng, SUN Yao-qiang, GAO Liu-yi, et al. Research and Application of Antibacterial Fresh-keeping Film[J]. *Food Science and Technology*, 2005(4): 146—147.
- [36] 邓雯瑾, 蒋汶龙, 陈安均, 等. 百里香精油抗菌涂层包装对鲜切生菜货架期内理化品质及微生物的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016(7): 247—253.  
DENG Wen-jin, JIANG Wen-long, CHEN An-jun, et al. Effect of Antimicrobial Coating Packaging of Thyme Oil on the Physical and Chemical Quality and Microorganism of Fresh-cut Lettuce during Shelf Life [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2016(7): 247—253.
- [37] 李欢, 张东林, 莫妮, 等. 活性包装在肉产品中的应用及应用现状[J]. *肉类研究*, 2013(12): 23—27.  
LI Huan, ZHANG Dong-lin, MO Ni, et al. Research and Application of Active Packaging in Meat Products[J]. *Meat Research*, 2013(12): 23—27.
- [38] MUPPALLA S R, KANATT S R, CHAWLA S P, et al. Garboxymethyl Cellulose-polyvinyl Alcohol Films with Clove Oil for Active Packaging of Ground Chicken Meat[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2014, 2: 51—58.
- [39] HAN Chun-yang, WANG Jian-qing, LI Yang, et al. Antimicrobial-coated Polypropylene Films with Polyvinyl Alcohol in Packaging of Fresh Beef[J]. *Meat Science*, 2014, 96: 901—907.
- [40] 肖乃玉, 卢曼萍, 陈少君, 等. 阿魏酸-胶原蛋白抗菌膜在腊肠保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2014(4): 210—215.  
XIAO Nai-yu, LU Man-ping, CHEN Shao-jun, et al. Application of Ferulic Acid-collagen Antibacterial Film in Freshness of Sausage[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2014(4): 210—215.