

# 多糖类可食性膜的研究进展

李 帅, 钟耕辉, 刘玉梅\*

(新疆大学化学化工学院, 煤炭清洁转化与化工过程自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:** 可食性膜是目前食品包装领域研究的重要方向, 其中, 多糖类可食性膜因具有均匀、透明等特点而备受青睐。目前, 多糖类可食性膜的研究主要集中在改善其应用性能的同时, 赋予其抗氧化性、抑菌性等更多的生物活性, 因此展现出良好的应用前景。本文在简要介绍多糖类可食性膜的主要组成、性能的基础上, 对其成膜机理、生物活性及应用发展进行了综述。

**关键词:** 可食性膜; 多糖; 成膜机理

## Progress in Edible Films Prepared with Polysaccharides

LI Shuai, ZHONG Genghui, LIU Yumei\*

(Key Laboratory of Coal Cleaning Conversion and Chemical Engineering Process, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Ürümqi 830046, China)

**Abstract:** Edible films represent an important research direction in food packaging. In particular, those prepared with polysaccharides are highly favored because of their good uniformity and transparency. Today, research efforts are focused on endowing edible films with a wider range of biological activities such as antioxidant and antimicrobial in addition to improving their applicability, thus presenting promising application prospects. The main components, properties, film-forming mechanisms and biological activities of edible films prepared with polysaccharides are reviewed in this paper. Furthermore, future application prospects are also discussed.

**Keywords:** edible film; polysaccharide; film forming mechanism

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803046

中图分类号: TS206.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 03-0309-08

引文格式:

李帅, 钟耕辉, 刘玉梅. 多糖类可食性膜的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 309-316. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803046. <http://www.spkx.net.cn>

LI Shuai, ZHONG Genghui, LIU Yumei. Progress in edible films prepared with polysaccharides[J]. Food Science, 2018, 39(3): 309-316. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201803046. <http://www.spkx.net.cn>

食品包装是阻止食品在流通过程中被各种外源性污染的重要途径。常用的食品包装材料有玻璃、塑料、纸、金属及各种复合包装等, 其中塑料包装材料因质量轻、成本低、强度大、使用方便而深受消费者青睐。然而近年来, 塑料包装材料不但因降解困难, 易引发白色污染、土壤污染等环境问题受到各方关注, 而且塑料包装材料中存在的塑化剂、防腐剂及抗氧化剂等化学品在长期大量使用时可能迁移到食品中, 进而影响人体肝脏、生殖系统的正常工作, 导致激素失调、儿童性早熟、哮喘、癌症、心血管疾病、多发性神经炎等一系列病症<sup>[1-4]</sup>。因此, 研发能替代传统塑料包装的环境友好、

健康安全食品包装材料是食品科学研究工作的重要任务, 而可食性包装材料即是一个重要方向。

可食性膜具有类似塑料包装材料的很多特性, 所选用的原料多为食品原辅料, 取材方便、安全性好, 同时还具有易被生物降解、对环境无污染等优点。可食性包装膜的应用在我国历史悠久, 代表性的如传统的糯米纸包装, 但因耐潮、耐热性差而限制了其广泛使用。可食性包装膜这一概念早在20世纪50年代就被正式提出, 但直到1967年, 尚未有大规模商业应用的报道; 至20世纪80年代中期, 可食性膜开始受到关注并迅速发展; 到1996年, 全球已有约600家公司开始销售可食性膜<sup>[5]</sup>。近

收稿日期: 2017-06-27

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (31660490)

第一作者简介: 李帅 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分析化学。E-mail: JasonandJarry@163.com

\*通信作者简介: 刘玉梅 (1965—), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品功能因子。E-mail: xjdxlym@163.com

20年来,有关可食性膜理化性能的改善、抑菌性等生物活性功能的强化等研究工作在不断深入,可食性膜的研究和应用得到了长足的发展,本文就该领域的研究进展进行综述。

## 1 可食性膜概述

### 1.1 可食性膜的定义、分类及特点

可食性膜,也被称为可食用膜,是以可食性生物大分子物质为主要基质,辅以可食性增塑剂,通过一定的处理工序使各成膜剂分子之间相互作用,使之在干燥后形成一种具有一定力学性能和选择透过性的结构致密的薄膜<sup>[6]</sup>。可食性膜以包裹、浸渍、涂布、喷洒等形式覆盖于食品表面,通过防止水分、芳香成分等的迁移来避免食品在贮运过程中发生风味等方面的变化,从而延长了食品的货架期<sup>[7-8]</sup>。根据所使用的基材不同,可食性膜主要分为多糖类可食性膜、蛋白类可食性膜、脂质类可食性膜及复合型可食性膜4类,常用基材及特点见图1。

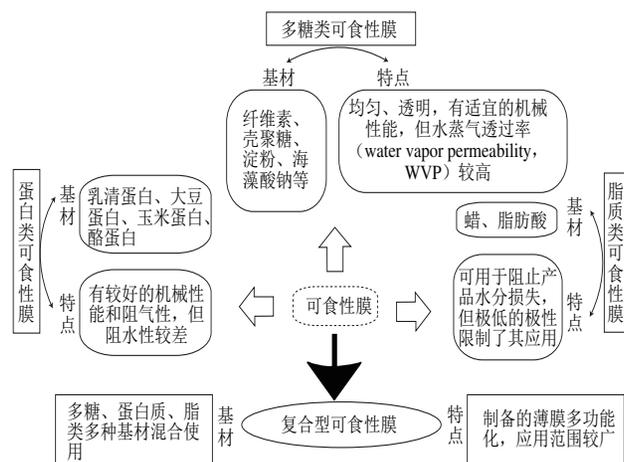


图1 可食性膜的分类及特点

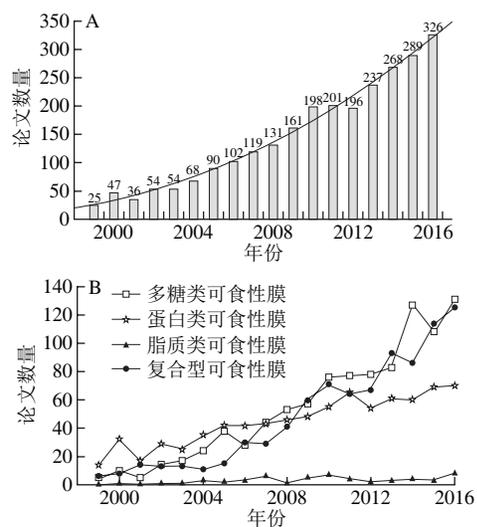
Fig. 1 Classification and characteristics of edible films

多糖类物质因其分子结构上均匀分布的极性基团增加了大分子间氢键和静电引力的作用,为膜的形成奠定了基础<sup>[9]</sup>。以动植物蛋白为基材,通过氢键、二硫键、疏水作用等制备具有一定力学性能及阻隔性的薄膜是蛋白类可食性膜的特点<sup>[10]</sup>。脂质类可食性膜是以天然脂肪类物质制备的,因其难溶于水而具有良好的阻水特性,但极低的极性限制了其应用,主要是与其他多糖、蛋白质等基材混合制备复合型可食性膜。复合型可食性膜是将多糖、蛋白质、脂类多种基材混合使用,取长补短,制备可满足各种需求的薄膜,也是研究较多、应用较广的一类可食性膜。

### 1.2 可食性膜的研究进展

文献数量的变化是反映研究领域发展的重要指

标。图2列出了ISI Web of Science平台(<http://apps.whoofknowledge.com/>)上截至2016年发表的关于可食性膜的论文数量及其分类。由图2可知,可食性膜的论文篇数基本上呈逐年上升趋势,且在2016年最多,共发表论文326篇。其中,脂质类可食性膜的研究报道始终维持在较低数量;蛋白类可食性膜在2007年之前为主要研究类型,在2007年之后论文数量趋于平缓;而多糖类可食性膜和复合型可食性膜的研究逐渐增加,日益受到关注。2014年以来,有关多糖类及以多糖为主的复合型可食性膜的论文数量增加较快,为蛋白类和脂质类可食性膜总量的1.5倍左右。目前,已有多糖类可食性膜的综述报道<sup>[11-13]</sup>,偏重对膜的基材、性能的总结,涉及成膜机理、生物活性等较少。因此,本文重点就多糖类可食性膜的主要组成、性能、成膜机理、生物活性及应用等进行归纳和总结。



A.文献总量; B.研究分类。第一个数据点为1999年前发表的文献总和; 其余数据点为对应年份发表的论文数。

图2 截至2016年发表的有关可食性膜的论文统计

Fig. 2 Statistics of publications concerning edible films from 1999 to 2016

## 2 多糖类可食性膜的主要组成

### 2.1 多糖类可食性膜的常用基材

多糖类可食性膜主要以淀粉及其衍生物、纤维素及其衍生物、壳聚糖、海藻酸钠、普鲁兰多糖、果胶等为基材。其中,淀粉是可食性膜中应用最早的基材,来源于玉米、红薯、马铃薯、木薯、大米、小麦等,主要成分是直链淀粉。直链淀粉是由两分子葡萄糖经脱水缩合形成的麦芽糖通过 $\alpha$ -1,4糖苷键连接成的淀粉,其具有良好的成膜特性,可赋予膜坚韧和无色无味的特性。纤维素是自然界中另一类分布广、含量高的多糖,是由D-吡喃葡萄糖残基以 $\beta$ -1,4糖苷键连接而成的大分子多糖,也具有较好的成膜特性。壳聚糖是目前多糖类可食性膜中

应用最广泛的基材, 化学名为 $\beta$ - (1 $\rightarrow$ 4) -2-氨基-2-脱氧-D-葡萄糖, 主要从真菌、藻类等的细胞壁及昆虫类、甲壳类等动物外壳中分离出甲壳素, 再经脱乙酰作用而得到。壳聚糖膜具有生物可降解性及广谱抑菌性<sup>[14-16]</sup>。海藻酸钠则是从褐藻中提取的一种线性多糖, 其化学组成为 $\beta$ -D型甘露糖醛酸 (M块) 和 $\alpha$ -L型古洛糖醛酸 (G块) 两种单体, 通过 $\alpha$ -1,4糖苷键以3种方式 (MM段、GG段和MG段) 连接而成的一种无支链的线性嵌段高分子化合物, 也具有较好的成膜性及水溶性。普鲁兰多糖是由葡萄糖经两个 $\alpha$ -1,4糖苷键连接成麦芽三糖, 再通过 $\alpha$ -1,6糖苷键聚合成链状聚麦芽三糖, 其制备的膜透明, 具有较低的氧气透过率 (oxygen transmission rate, OTR), 且在一定程度上能抑制食品中真菌的生长<sup>[17-19]</sup>。果胶则是一组聚半乳糖醛酸, 主要成分为部分甲酯化的 $\alpha$ - (1 $\rightarrow$ 4) -D-聚半乳糖醛酸, 同样具有良好的成膜特性。

## 2.2 多糖类可食性膜中的常用增塑剂

多糖类可食性膜常用的增塑剂主要是以多元醇类为主, 主要有甘油、山梨醇、乙二醇等。增塑剂是嵌入高聚物之间的小分子, 能降低膜的脆性及硬度, 增大高聚物分子间的距离, 增加膜的柔软性, 降低高聚物分子间的玻璃化转变温度并且提高其反应速率<sup>[20]</sup>。此外, 增塑剂的添加还会影响膜的其他性能, 如机械性能、透气性等。Zhang Pingping等<sup>[21]</sup>将甘油和山梨醇加入到达瓦树胶 (又称印度树胶, 化学组成为L-阿拉伯糖、D-半乳糖、D-甘露糖、D-木糖和D-葡萄糖醛酸, 物质的量之比依次为10:6:2:1:2) 中制备具有较好力学性能的可食性膜。随着增塑剂添加量的增加, 抗拉强度逐渐降低, 断裂伸长率、WVP、OTR则逐渐增大。

## 2.3 多糖类可食性膜中的常用添加剂

为了赋予可食性膜更多的功能, 在制备过程中常会添加一些天然的抑菌剂、抗氧化剂等, 使可食性膜在作为包装材料的同时还可发挥抑菌、抗氧化等功效, 以增加食品的安全性, 由此得到的膜常被称为可食性功能膜。多糖类可食性膜中常用的功能性添加剂主要为抑菌剂和抗氧化剂。

### 2.3.1 抑菌剂

抑菌剂是指能够抑制微生物 (细菌、真菌、酵母菌、藻类及病毒等) 生长的化学物质。基于化学组成类别的不同, 抑菌剂主要为无机和有机类抑菌剂两种。其中, 无机类抑菌剂主要以 $Ag^+$ 为主, 其通过接触反应发挥抑菌作用: 当微量的 $Ag^+$ 到达微生物细胞膜时, 因细胞膜带负电荷, 依靠库仑引力, 两者牢固吸附,  $Ag^+$ 穿透细胞壁进入胞内, 并与-SH反应, 使蛋白质凝固, 破坏细胞合成酶的活性, 造成细胞丧失分裂增殖能力而死亡<sup>[22]</sup>。以 $Ag^+$ 为代表的无机抑菌剂制备的材料主要用于抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等, 但这类抑菌剂不在可

食性膜的范畴。有机类抑菌剂种类较多, 包括有机酸/酯类、醇/酚类、醛类、季铵盐类等, 其作用机理不尽相同。根据来源的不同, 还可将其分为天然抑菌剂和合成抑菌剂, 合成抑菌剂因可能的毒副作用在可食性功能膜中逐渐被摒弃, 而天然抑菌剂因无毒, 且与其他物质的生物相容性较好而应用广泛, 但其抑菌活性较合成抑菌剂弱。目前, 天然来源的抑菌剂为多糖类可食性功能膜的首选, 主要为具有较强抑菌活性的丁香、肉桂、牛至、百里香等植物的精油和各种植物酚类提取物等。

### 2.3.2 抗氧化剂

抗氧化剂是阻止氧化反应发生的物质。对于食品而言, 抗氧化剂是指能防止或延缓食品氧化、提高食品稳定性和延长货架期的食品添加剂。抗氧化剂主要为合成抗氧化剂和天然提取抗氧化剂两种。合成抗氧化剂, 如丁基羟基茴香醚、二丁基羟基甲苯、叔丁基对苯二酚、没食子酸丙酯等, 因存在安全隐患正逐步被天然抗氧化剂所替代。常见的天然抗氧化剂主要为来源于水果、蔬菜及各类植物中的精油、黄酮类、多酚类化合物等提取物等。

表1归纳了多糖类可食性膜中常用的基材、增塑剂和添加剂。

表1 多糖类可食性膜的基材、增塑剂和添加剂  
Table 1 Substrates, plasticizers and additives for edible films prepared with polysaccharides

基材	复合基材	增塑剂	添加剂	文献
淀粉及其衍生物	CMC钠、鱼蛋白、CW、壳聚糖	甘油、山梨醇	牛至、大蒜精油; 山梨酸钾; 酒花、迷迭香、百里香等提取物	[23-27]
纤维素及其衍生物	CW、卵磷脂、明胶	甘油、山梨醇	$\alpha$ -生育酚、山梨酸、百里酚、肉桂醛; 柑橘、酒花、黑木杯裂香提取物	[25,28-31]
壳聚糖	玉米蛋白、花生分离蛋白、明胶	甘油	肉桂、牛至、丁香、百里香精油; 泡粉素、异硫氰酸烯丙酯、没食子酸、阿魏酸; 百里香、马基莓、肉桂、瓜拉纳、迷迭香提取物	[27,32-40]
海藻酸钠	CMC、明胶	甘油	山梨酸钾; 丁香、肉桂、牛至精油; 茶多酚	[41-44]
普鲁兰多糖	淀粉、明胶	甘油	月桂酸精氨酸酯、乳酸链球菌素Z; 卑尔根提取物	[45-48]
果胶	乳清分离蛋白、木瓜膏	甘油	山梨酸钾、苯甲酸钠、乳酸链球菌素、柠檬酸、肉桂醛	[49-51]

注: CMC.羧甲基纤维素 (carboxymethylcellulose); CW.小烛树蜡 (candelilla wax)。

## 3 多糖类可食性膜的物理性能

作为一种包装材料, 多糖类可食性膜应具有较好的机械性能、光学性能、阻隔性能等多方面的物理特性, 评价上述性能常用的测试仪器主要有静态力学测试仪、紫外-可见分光光度计、电子天平 (质量法), 对其微观结构的测试主要采用扫描电子显微镜 (或透射电子显微镜)、原子力显微镜。

### 3.1 机械性能

评价机械性能的主要指标为抗拉强度、断裂伸长率。抗拉强度和断裂伸长率主要与膜的微观结构有关,而膜的微观结构又取决于膜的基材、基材与增塑剂(或添加剂)的比例及制备条件(干燥温度、相对湿度等)等<sup>[52]</sup>。

### 3.2 光学性能

膜的透明度是反映膜光学性能的重要参数,同时也影响着产品外观及消费者的接受度。Kowalczyk等<sup>[25,53]</sup>研究了将酒花乙醇提取物(ethanolic hop extract, EHE)和抗坏血酸(ascorbic acid, AA)加入到CMC-CW和氧化马铃薯淀粉(oxidized potato starch, OPS)-CW中引起的透明度(以600 nm波长处的吸光度与膜的厚度/mm的比值计)的变化。当不加添加剂时,CMC-CW和OPS-CW的透明度分别为6.36、1.93 mm<sup>-1</sup>;加入质量分数0.5%的添加剂时,CMC-CW-EHE和OPS-CW-EHE的透明度为8.36、3.02 mm<sup>-1</sup>,而CMC-CW-AA和OPS-CW-AA的透明度为5.97、3.02 mm<sup>-1</sup>,说明透明度与制备膜的基材、添加剂种类和浓度及添加剂在水或乙醇中的溶解度有关。

### 3.3 其他性能

除上述性能外,膜的物理性能还包括含水量、溶解性、溶胀度及阻隔性能等。其中,阻隔性能是阻止被包裹食品与外界环境之间发生水蒸气、芳香成分、O<sub>2</sub>、

CO<sub>2</sub>等物质的迁移,延长食品货架期的重要评价指标。而WVP和OTR也是常用的两个指标。WVP主要取决于膜成分中的亲水性物质和疏水性物质的比例,需根据不同食品对膜的WVP进行调控。对于多糖类可食性膜而言,其WVP较高,通常可加入脂类物质制备复合膜以降低其WVP<sup>[54-55]</sup>。与WVP相比,膜OTR的测定较少。OTR取决于膜的制备条件,该值的变化会间接影响膜的抗氧化性。

近年来,对于多糖类可食性膜的研究主要集中于可食性功能膜,表2列出了部分多糖类可食性功能膜的相关性能。

## 4 多糖类可食性膜的成膜机理

多糖类物质含有羟基、羰基、氨基等官能团,在可食性膜中主要是通过氢键等范德华力与自身及其他物质发生作用。Du Hengjun等<sup>[67]</sup>以金针菇多糖制备可食性膜,通过不同干燥时间的红外光谱图揭示了金针菇多糖可能是通过分子内和分子间氢键结合。姚遥等<sup>[17]</sup>研究了魔芋葡甘聚糖和普鲁兰多糖制备的复合膜,发现两种多糖之间均存在氢键作用。除了多糖-多糖分子间的氢键作用,多糖与蛋白质间也存在氢键作用。研究发现,普鲁兰多糖与明胶也能够通过氢键作用制备可食性膜,并且氢键作用影响着膜的机械性能及阻隔性能<sup>[68]</sup>。在可食性

表2 多糖类可食性功能膜的机械性能、光学性能和阻隔性能  
Table 2 Mechanical, optical and barrier properties of functional edible films prepared with polysaccharides

基材	添加剂	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	透明度	透气性	文献
淀粉	酒花提取物(0.10%~0.50%,质量分数,下同)	3.64~4.67	72.82~83.60	差	WVP: 24.03~37.04 g·mm/(m <sup>2</sup> ·d·kPa)	[25]
玉米淀粉-玉米蛋白-酪蛋白酸钠	芦丁(0.25 g/L)	1.19~2.42	42.10~78.84	差	WVP: 1.35~1.54 g/(mm·s·kPa)	[56]
大米淀粉-鱼蛋白	牛至精油(4%~8%)	3.92~6.79	83.5~108.8	—	WVP: 0.18~0.21 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa)	[23]
淀粉-壳聚糖	百里香提取物(0.15%)	7.3~13.0	29~90	—	WVP: 6.9~11.6 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa) OTR: 4.1~14.0 mL·μm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa)	[27]
红米淀粉-红米粉	无	0.93~1.29	46.21~49.73	—	WVP: 1.34~1.25 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa)	[57]
木薯淀粉-明胶	肉桂/丁香/牛至精油(0.5%)	22~25	8~17	—	WVP: 4.2~5.9 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa) OTR: 0.36×10 <sup>-13</sup> ~0.52×10 <sup>-13</sup> cm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·s·Pa)	[58]
木薯淀粉-果胶-CMC钠	无	4.72	38.0	好	—	[59]
CMC	酒花提取物(0.10%~0.50%)	8.35~17.20	17.55~28.28	差	WVP: 28.2~50.7 g·mm/(m <sup>2</sup> ·d·kPa)	[25]
CMC	精油(体积分数1%~3%)	16.96~58.84	20.77~30.40	—	WVP: 2.98×10 <sup>-10</sup> ~5.79×10 <sup>-10</sup> g/(m·s·Pa)	[60]
壳聚糖-明胶	牛至精油(0~12 g/L)	18.49~44.35	33.97~41.25	好	WVP: 0.41~0.76 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa)	[33]
壳聚糖-玉米蛋白	阿魏酸/没食子酸(5.54 g/L)	0.726~2.589	3.185~22.710	—	WVP: 0.022~0.085 g·mm/(cm <sup>2</sup> ·d)	[37]
壳聚糖	百里香精油(体积分数0~1.2%)	31.05~51.20	1.8~4.8	—	WVP: 6.49~8.33 mol/(cm·min·kPa) OTR: 1.24~4.62 mm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·d)	[61]
壳聚糖	槲皮素(0.2 g/L)	5.48~6.67	35.16~39.54	—	WVP: 23.38×10 <sup>-11</sup> ~24.00×10 <sup>-11</sup> g/(m·s·Pa) OTR: 6.20×10 <sup>-13</sup> ~7.47×10 <sup>-13</sup> g·m/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)	[62]
壳聚糖	孢粉素(1~4 g/L)	2.04~2.92	40.09~42.42	差	—	[40]
壳聚糖	葡萄果渣提取物(1.5~7.5 g/L)	6.88~13.58	35.11~53.48	—	—	[63]
果胶-木瓜酱	肉桂醛(1.0%)	4.84~20.54	17.13~246.10	—	WVP: 0.61~3.26 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa)	[50]
海藻酸钠-壳聚糖-大豆卵磷脂	无	0.96	16.62	—	WVP: 6.31×10 <sup>-12</sup> g/(m·h·Pa)	[64]
仙草胶-酪蛋白	无	0.55~3.53	18.20~65.78	差	WVP: 0.691~0.937 g·mm/(m <sup>2</sup> ·h·kPa)	[65]
罗勒种子胶	牛至精油(体积分数0~6%)	—	—	—	WVP: 3.7×10 <sup>-11</sup> ~4.3×10 <sup>-11</sup> g·mm/(m <sup>2</sup> ·s·Pa)	[66]

注: —,未测定。下同。

膜的形成过程中,除基材、增塑剂之间的氢键作用外,水分子也扮演着重要角色。肖茜<sup>[5]</sup>以傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)结合二维相关性分析法研究了普鲁兰多糖、海藻酸钠与水分子间的氢键作用,揭示了普鲁兰多糖、海藻酸钠及复合膜中水分子的脱除模式,并以全衰减(attenuated total reflection, ATR)-FTIR技术对被吸附的水分和普鲁兰多糖膜、海藻酸钠膜以及复合可食性膜之间的相互作用进行研究,提出在不同水分活度( $a_w$ )下,基材与水分子间以及水分子自身存在极弱、弱、中等、强等不同类型的氢键作用。当 $a_w=0.84$ 时,水分子中的两个氢供体都能与多糖吸附位点结合,这类水分子对可食性膜具有增塑作用,因此对膜的机械性能、阻隔性能以及热性能均有非常大的影响。以海藻酸钠和普鲁兰多糖为例,多糖类可食性膜的成膜机理见图3。

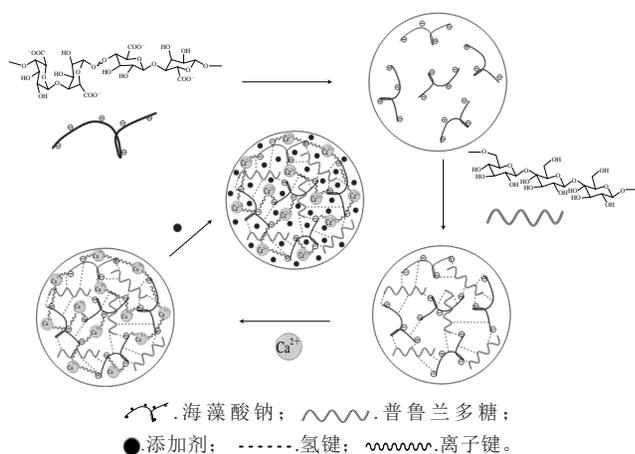


图3 多糖类可食性膜的成膜机理

Fig. 3 Film-forming mechanisms of edible films prepared with polysaccharides

### 5 多糖类可食性功能膜的生物活性

#### 5.1 抗氧化性

脂质过氧化是引起食品质量下降甚至变质的重要原因之一,而引起脂质过氧化的主要原因在于自由基。添加具有抗氧化性能的添加剂可制备具有抗氧化作用的可食性功能膜,这也有望成为抑制食品脂质过氧化的重要手段。抗氧化的测定方法有体内抗氧化检测和体外抗氧化检测,体内抗氧化检测能更准确反映抗氧化物质的抗氧化性能,但体内干扰因素多,对结果影响大,重现性差,而体外抗氧化检测操作简单,重复性好。因此,一般选择体外抗氧化检测评价抗氧化物质的抗氧化性。目前,可食性功能膜的抗氧化能力的评价方法主要有1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)自由基清除能力、 $Fe^{3+}$ 还原能力、 $Fe^{2+}$ 螯合活性。表3列举了近年来多糖类可食性功能膜的抗氧化活性的研究结果。

表3 多糖类可食性功能膜的抗氧化性

Table 3 Antioxidant activities of functional edible films prepared with polysaccharides

基材	添加剂	DPPH自由基清除能力	ABTS <sup>+</sup> 清除能力	Fe <sup>3+</sup> 还原能力	Fe <sup>2+</sup> 螯合活性	文献
玉米淀粉-玉米蛋白-酪蛋白酸钠	芦丁(0.25 g/L)	++	++	-	-	[56]
CMC	精油(体积分数1%~3%)	+++	-	-	-	[60]
壳聚糖	葡萄果渣提取物(1.5~7.5 g/L)	+	+	++	-	[63]
壳聚糖-玉米蛋白	阿魏酸/没食子酸(5.54 g/L)	+++	+++	-	-	[37]
壳聚糖	马基莓提取物(0.00~0.01 mL/g)	++	-	+++	+++	[38]
壳聚糖	百里香精油(10~20 g/L)	++	-	++	-	[69]

注: +++、++、+分别表示具有较强、中等、较弱的抗氧化活性。

表4 多糖类可食性功能膜的抑菌活性

Table 4 Antibacterial activities of functional edible films prepared with polysaccharides

基材	添加剂	测试菌株(抑菌圈直径/mm或抑菌率/%或抑菌圈面积/mm <sup>2</sup> )	文献
木薯淀粉-明胶	肉桂丁香/牛至精油(0.5%)	尖孢镰刀菌(36~57 mm)、苹果炭疽菌(30~52 mm)	[58]
CMC	精油(体积分数1%~3%)	金黄色葡萄球菌(0.00~57.66 mm)、蜡状芽孢杆菌(0.00~55.33 mm)、大肠杆菌(0.00~56.33 mm)、铜绿假单胞菌(0.00~16.33 mm)、鼠伤寒沙门氏菌(0.00~30.66 mm)	[60]
壳聚糖-玉米蛋白	阿魏酸/没食子酸(5.54 g/L)	大肠杆菌(10%~40%)、金黄色葡萄球菌(25%~50%)	[37]
壳聚糖	百里香精油(体积分数0.0%~1.2%)	大肠杆菌(0~17 mm)、肺炎克雷伯杆菌(0~19 mm)、铜绿假单胞菌(0~16 mm)、金黄色葡萄球菌(0~16 mm)	[61]
壳聚糖	百里香精油(10~20 g/L)	李斯特菌(0.00~27.36 mm)、沙雷氏菌(0.00~32.36 mm)、粪产碱杆菌(0.00~35.08 mm)	[69]
壳聚糖-明胶	牛至精油(0~12 g/L)	金黄色葡萄球菌(0.00~34.66 mm)、李斯特菌(0.00~32.33 mm)、大肠杆菌(0.00~32.00 mm)、肠炎沙门氏菌(0.00~33.33 mm)	[33]
壳聚糖-酪蛋白酸钠	纳他霉素/溶菌酶(0.7、10 g/L)	假单胞菌(11.30~18.30 mm)、大肠杆菌(11.00~14.00 mm)、酵母菌(12.00~19.00 mm)、金黄色葡萄球菌(11.00~15.30 mm)、霉菌(8.66~20.00 mm)	[71]
壳聚糖	槲皮素(0.2 g/L)	大肠杆菌(25.3~29.3 mm)、志贺氏菌(22.3~25.0 mm)、奇异变形杆菌(22.6~27.0 mm)、摩根摩根氏菌(24.3~27.6 mm)、表皮葡萄球菌(21.0~24.3 mm)、藤黄微球菌(24.0~24.3 mm)、枯草芽孢杆菌(24.0~26.0 mm)	[62]
壳聚糖	马基莓提取物(0.00~0.01 mL/g)	黏质沙雷氏菌(0.00~17.07 mm)、嗜水气单胞菌(0.00~18.59 mm)、反硝化无色杆菌(0.00~22.94 mm)、粪产碱杆菌(0.00~21.03 mm)、荧光假单胞菌(12.86~22.03 mm)、弗氏柠檬酸杆菌(0.00~18.67 mm)、腐败希瓦菌(14.32~21.89 mm)	[38]
壳聚糖	肉桂醛(体积分数0~2%)	大肠杆菌(6~12 mm)、金黄色葡萄球菌(6~14 mm)、沙门氏菌(6~15 mm)	[72]
普鲁兰多糖	单尔根提取物(0~200 g/L)	金黄色葡萄球菌(0.00~24.89 mm)、枯草芽孢杆菌(0.00~19.65 mm)、肠炎沙门氏菌(0.00~15.83 mm)、大肠杆菌(0 mm)、青霉菌(0.00~13.79 mm)、黑曲霉菌(0.00~13.83 mm)	[45]
果胶-木瓜酱	肉桂醛(1.0%)	大肠杆菌(0.00~104.72 mm <sup>2</sup> )、肠炎沙门氏菌(0.00~256.06 mm <sup>2</sup> )、李斯特菌(0.00~375.22 mm <sup>2</sup> )、金黄色葡萄球菌(0.00~710.65 mm <sup>2</sup> )	[50]

表5 多糖类可食性膜的应用  
Table 5 Applications of edible film prepared with polysaccharides

研究对象	基材	添加剂	应用效果	文献
草莓	木薯淀粉-壳聚糖	LGRA106精油 (体积分数2.4%)	与空白比, 涂膜能有效抑制霉菌、酵母菌和总嗜冷菌的生长, 使草莓的放置时间延长4 d	[73]
枇杷果	壳聚糖-魔芋葡甘聚糖	无	以空白和聚乙烯膜为对照, 复合膜降低了果实腐烂率、糖酸转化速率、呼吸强度, 避免了营养成分的损失, 保持了原有风味的品质, 延长了货架期	[74]
烤腰果	甲基纤维素-余甘子果泥	余甘子提取物 (0.5%)	以甲基纤维素-余甘子果泥为对照, 经含有余甘子提取物涂膜处理后, 具有较高的游离脂肪酸含量, 较低的过氧化指数, 且较好地保持了风味	[75]
	海藻胶	茶多酚 (6 g/L)	以空白为对照, 涂膜对冬枣风味的损失具有一定的延缓作用, 能有效地控制质量损失率、转红率和腐烂率, 保持较好的感官品质	[76]
冬枣	海藻酸钠-葵花油	茶多酚 (1 g/L)	以空白及海藻酸钠膜液为对照, 含有茶多酚的涂膜降低了冬枣红色指数, 抑制了呼吸强度、电解质渗出率、丙二醛含量的增加, 维持了果实硬度、叶绿素、AA、总酚含量, 保持了超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶的活性	[41]
	魔芋葡甘聚糖-乳清蛋白	蜜柚精油 (体积分数0.5%)	以空白为对照, 涂膜可以减少果实质量损失, 保护细胞膜, 降低呼吸强度, 抑制蜜柚的生理代谢, 减少营养物质的损失, 延缓软化发生	[77]
苹果、土豆、胡萝卜	果胶-乳清蛋白	无	以空白及乳清蛋白膜为对照, 添加果胶的复合膜能减缓苹果、土豆、胡萝卜的质量损失, 抑制微生物的生长, 维持了较高的总酚含量, 基本保持果实硬度、咀嚼性	[51]
	果胶-木薯淀粉-CMC	无	以空白及聚乙烯膜为对照, 果胶复合膜具有较低的汁液流失率、pH值、挥发性盐基氮及细菌总数, 其保质期较对照组延长2 d以上	[59]
猪肉	壳聚糖	无	以聚乙烯膜为对照, 壳聚糖膜能有效控制挥发性盐基氮和细菌总数的增长, 肉的新鲜度延长2 d以上	[78]
	壳聚糖	丁香精油 (体积分数2%)	以空白和壳聚糖膜为对照, 添加精油的壳聚糖膜能有效抑制生肉腐败菌总数的增加和脂肪的氧化, 保持了良好的感官品质, 货架期延长了6 d	[79]

注: 空白指未经任何处理的对象。

## 5.2 抑菌性

食品在加工、运输、贮藏过程中容易滋生细菌、霉菌、酵母菌等, 而食源性致病菌也是微生物中的一大类群, 具有繁殖快、分布广、种类多、代谢强、易产生耐药性等特点, 是影响食品货架期的重要因素之一。因此, 使多糖类可食性膜在满足包装的同时还兼具抑菌功能, 对保证食品品质具有重要意义。Appendinia等<sup>[70]</sup>曾提出抗菌包装的几种类型: 1) 将含有挥发性抑菌剂的香袋放入包装袋中; 2) 直接在基材中添加挥发性/非挥发性抑菌剂; 3) 基材表面喷涂或吸附抑菌剂; 4) 通过离子键或共价键将抑菌剂固定在基材上; 5) 采用本身具有抑菌性的基材。目前, 可食性功能膜的研究中多采用直接添加抑菌剂的方式(类型2)。

对多糖类可食性功能膜抑菌活性的评价主要采用的是抑菌圈法, 表4列出了近年来多糖类可食性功能膜抑菌活性研究方面的进展。

## 6 多糖类可食性膜的应用前景

目前, 多糖类可食性膜的应用研究主要还是在各种水果、干果及蔬菜的保鲜方面, 也有少量用于肉制品保鲜的研究, 表5列出了近年来多糖类可食性功能膜在食品保鲜中的应用。

## 7 结语

消费者对食品安全的要求越来越高, 这为功能性可食性包装材料的应用提供了广阔的前景。多糖类可食性功能膜是一种非常有前途的新型包装形式, 但目前应用

中还存在很多需要进一步阐明的科学问题。其中, 筛选具有较强功能性的添加剂并将其应用于多糖类可食性功能膜, 添加剂的释放特征及其动力学、保鲜实验、多糖类可食性功能膜如何在非冷藏条件下依然保持其功能性等, 均为今后需要进一步深入研究的重点方向。此外, 随着微胶囊技术的逐渐发展, 将添加剂以微胶囊的形式加入到可食性功能膜中, 不仅能提高膜的透明度, 而且会增强多糖类可食性功能膜中添加剂的缓释效果。

## 参考文献:

- [1] HURST C H, WAXMAN D J. Activation of PPAR $\alpha$  and PPAR $\gamma$  by environmental phthalate monoesters[J]. *Toxicological Sciences*, 2003, 74(2): 297-308.
- [2] HOWDESHELL K L, WILSON V S, FURR J, et al. A mixture of five phthalate esters inhibits fetal testicular testosterone production in the sprague dawley rat in a cumulative, dose additive manner[J]. *Toxicological Sciences*, 2008, 105(1): 153-165.
- [3] 李劲彤, 李巧玲, 李朝阳, 等. 塑化剂剖析[J]. *食品工业*, 2014, 35(8): 235-238.
- [4] 李晓敏. 食品纸包装邻苯二甲酸酯类塑化剂检测方法及其安全性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016: 7.
- [5] 肖茜. 多糖基可食用膜成膜机理及水分子对膜的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 1.
- [6] 王海鸥. 可食性膜及其在食品工业中的应用[J]. *食品与机械*, 2002, 18(5): 4-8. DOI:10.3969/j.issn.1003-5788.2002.05.001.
- [7] 陈荔红, 郑宝东. 多糖类可食性膜的研究进展[J]. *农产品加工(学刊)*, 2008(11): 35-38. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646-B.2008.11.010.
- [8] ELSABEE M Z, ABDON E S. Chitosan based edible films and coatings: a review[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, 33(4): 1819-1841. DOI:10.1016/j.msec.2013.01.010.
- [9] 卢星池, 肖茜, 邓放明. 多糖类可食用膜研究进展[J]. *食品与机械*, 2014, 30(4): 261-265. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2014.04.065.
- [10] 黄志英, 雷桥, 包建强, 等. 蛋白薄膜包装性能的研究进展[J]. *包装工程*, 2013, 34(15): 146-151.

- [11] 孙中琦, 王雅立, 马真, 等. 多糖类纳米可食性保鲜膜的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(2): 54-58. DOI:10.3969/j.issn.1005-1295.2015.02.013.
- [12] 高丹丹, 江连洲, 张超, 等. 提高多糖类可食性膜机械性能的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 432-434. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.06.105.
- [13] WU Y M, WANG Z W, HU C Y, et al. Influence of factors on release of antimicrobials from antimicrobial packaging materials[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016: 1-14. DOI:10.1080/10408398.2016.1241215.
- [14] ULBIN-FIGLEWICZ N, ZIMOCZ-KORZYCKA A, JARMOLUK A. Antibacterial activity and physical properties of edible chitosan films exposed to low-pressure plasma[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(12): 3646-3654. DOI:10.1007/s11947-014-1379-6.
- [15] AVILA-SOSA R, PALOU E, MUNGUÍA 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(1/2): 66-72. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.017.
- [16] VÁSCONEZ M B, FLORES S K, CAMPOS C A, et al. Antimicrobial activity and physical properties of chitosan-tapioca starch based edible films and coatings[J]. Food Research International, 2009, 42(7): 762-769. DOI:10.1016/j.foodres.2009.02.026.
- [17] 姚遥, 肖满, 严文莉, 等. 魔芋葡甘聚糖-普鲁兰多糖复合膜的制备与性能研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 312-316. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.18.051.
- [18] 高丹丹, 徐学玲, 江连洲, 等. 普鲁兰多糖-明胶可食性膜的特性[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 69-73. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201401013.
- [19] SYNOWIEC A, GNIEWOSZ M, KRAŚNIEWSKA K, et al. Antimicrobial and antioxidant properties of pullulan film containing sweet basil extract and an evaluation of coating effectiveness in the prolongation of the shelf life of apples stored in refrigeration conditions[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 23: 171-181. DOI:10.1016/j.ifset.2014.03.006.
- [20] GALDEANO M C, MALI S, GROSSMANN M V E, et al. Effects of plasticizers on the properties of oat starch films[J]. Materials Science and Engineering: C, 2009, 29(2): 532-538. DOI:10.1016/j.msec.2008.09.034.
- [21] ZHANG Pingping, ZHAO Ya, SHI Qilong. Characterization of a novel edible film based on gum ghatti: effect of plasticizer type and concentration[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 153: 345-355. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.07.082.
- [22] 高毅颖. 银系纳米无机抗菌材料的制备及其抑菌效果检测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005: 8.
- [23] ROMANI V P, PRENTICE-HERNÁNDEZ C, MARTINS V G. Active and sustainable materials from rice starch, fish protein and oregano essential oil for food packaging[J]. Industrial Crops & Products, 2017, 97: 268-274. DOI:10.1016/j.indcrop.2016.12.026.
- [24] 赵国华, 郑刚, 刘丽丹, 等. 抗菌木薯淀粉可食膜的研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(4): 84-87. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.04.031.
- [25] KOWALCZYK D, BIENDL M. Physicochemical and antioxidant properties of biopolymer/candelilla wax emulsion films containing hop extract: a comparative study[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 384-392. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.04.010.
- [26] PIÑEROS-HERNANDEZ D, MEDINA-JARAMILLO C, LÓPEZ-CÓRDOBA A, et al. Edible cassava starch films carrying rosemary antioxidant extracts for potential use as active food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 488-495. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.09.034.
- [27] TALÓN E, TRIFKOVIC K T, NEDOVIC V A, et al. Antioxidant edible films based on chitosan and starch containing polyphenols from thyme extracts[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 1153-1161. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.10.080.
- [28] MARTELLI S M, MOTTA C, CAON T, et al. Edible carboxymethyl cellulose films containing natural antioxidant and surfactants:  $\alpha$ -tocopherol stability, *in vitro* release and film properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 21-29. DOI:10.1016/j.lwt.2016.11.026.
- [29] 杨玲玲. 天然纤维素基抗菌膜的制备及其控释性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 10-14.
- [30] CHANA-THAWORN J, CHANTHACHUM S, WITTAYA T. Properties and antimicrobial activity of edible films incorporated with kiam wood (*Cotyleobium lanceotatum*) extract[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 284-292. DOI:10.1016/j.lwt.2010.06.020.
- [31] ITURRIAGA L, OLABARRIETA I, DE MARANON I M. Antimicrobial assays of natural extracts and their inhibitory effect against *Listeria innocua* and fish spoilage bacteria, after incorporation into biopolymer edible films[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 158(1): 58-64. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2012.07.001.
- [32] 李鹏, 冯燕玲, 杨伟强. 含肉桂精油壳聚糖-花生分离蛋白可食性膜的研制[J]. 食品工业, 2014, 35(12): 140-143.
- [33] HOSSEINI S F, REZAEI M, ZANDI M, et al. Bio-based composite edible films containing *Origanum vulgare* L. essential oil[J]. Industrial Crops & Products, 2015, 67: 403-413. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.01.062.
- [34] BONILLA J, SOBRAL P J A. Investigation of the physicochemical, antimicrobial and antioxidant properties of gelatin-chitosan edible film mixed with plant ethanolic extracts[J]. Food Bioscience, 2016, 16: 17-25. DOI:10.1016/j.fbio.2016.07.003.
- [35] 程欣, 余平, 王淑娟, 等. 丁香精油食品抗菌包装材料的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 11-15.
- [36] GUO M M, JIN T Z, YADAV M P, et al. Antimicrobial property and microstructure of micro-emulsion edible composite films against *Listeria*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 208: 58-64. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2015.03.018.
- [37] CHENG S Y, WANG B J, WENG Y M. Antioxidant and antimicrobial edible zein/chitosan composite films fabricated by incorporation of phenolic compounds and dicarboxylic acids[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 115-121. DOI:10.1016/j.lwt.2015.03.030.
- [38] GENSKOWSKY E, PUENTE L A, PÉREZ-ÁLVAREZ J A, et al. Assessment of antibacterial and antioxidant properties of chitosan edible films incorporated with maqui berry (*Aristotelia chilensis*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1057-1062. DOI:10.1016/j.lwt.2015.07.026.
- [39] RUIZ-NAVAJAS Y, VIUDA-MARTOS M, SENDRA E, et al. *In vitro* antibacterial and antioxidant properties of chitosan edible films incorporated with *Thymus moroderi* or *Thymus piperella* essential oils[J]. Food Control, 2013, 30(2): 386-392. DOI:10.1016/j.foodcont.2012.07.052.
- [40] KAYA M, AKYUZ L, SARGIN I, et al. Incorporation of sporopollenin enhances acid-base durability, hydrophobicity, and mechanical, antifungal and antioxidant properties of chitosan films[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2017, 47: 236-245. DOI:10.1016/j.jiec.2016.11.038.
- [41] ZHANG L H, LI S F, DONG Y, et al. Tea polyphenols incorporated into alginate-based edible coating for quality maintenance of Chinese

- winter jujube under ambient temperature[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 70: 155-161. DOI:10.1016/j.lwt.2016.02.046.
- [42] 孙瑶, 王瑞, 腾飞, 等. 海藻酸钠-羧甲基纤维素-山梨酸钾复合抗菌膜的制备[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 90-93.
- [43] 郭锦棠, 张瑾, 殷俊威. 抗菌性海藻酸钠膜的制备及性能分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(7): 653-658. DOI:10.11784/tdxb20130714.
- [44] KAZEMI S M, REZAEI M. Antimicrobial effectiveness of gelatin-alginate film containing oregano essential oil for fish preservation[J]. Journal of Food Safety, 2015, 35(4): 482-490. DOI:10.1111/jfs.12198.
- [45] KRAŚNIEWSKA K, GNIEWOSZ M, SYNOWIEC A, et al. The application of pullulan coating enriched with extracts from *Bergenia crassifolia* to control the growth of food microorganisms and improve the quality of peppers and apples[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 422-433. DOI:10.1016/j.fbp.2014.06.001.
- [46] PATTANAYAIYING R, H-KITTIKUN A, CUTTER C N. Incorporation of nisin Z and lauric arginate into pullulan films to inhibit foodborne pathogens associated with fresh and ready-to-eat muscle foods[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 207: 77-82. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2015.04.045.
- [47] 高丹丹, 江连洲, 张超, 等. 响应面法优化普鲁兰多糖-明胶可食性膜制备工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 21-24.
- [48] 郭培, 董海洲, 侯汉学, 等. 熔融挤出条件对可食性羟丙基交联淀粉-普鲁兰多糖复合膜性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(12): 33-37. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2011.12.024.
- [49] SANCHÍS E, GONZÁLEZ S, GHIDELLI C, et al. Browning inhibition and microbial control in fresh-cut persimmon (*Diospyros kaki* Thunb. cv. Rojo Brillante) by apple pectin-based edible coatings[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112: 186-193. DOI:10.1016/j.postharvbio.2015.09.024.
- [50] OTONI C G, DE MOURA M R, AOUADA F A, et al. Antimicrobial and physical-mechanical properties of pectin-papaya puree-cinnamaldehyde nanoemulsion edible composite films[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 41: 188-194. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.04.013.
- [51] MARQUEZ G R, DI PIERRO P, MARINIELLO L, et al. Fresh-cut fruit and vegetable coatings by transglutaminase-crosslinked whey protein/pectin edible films[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 124-130. DOI:10.1016/j.lwt.2016.08.017.
- [52] ATARÉS L, CHIRALT A. Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 48: 51-62. DOI:10.1016/j.tifs.2015.12.001.
- [53] KOWALCZYK D. Biopolymer/candelilla wax emulsion films as carriers of ascorbic acid: a comparative study[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 543-553. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.07.034.
- [54] 唐亚丽, 赵伟, 卢立新, 等. 脂质-CMC可食性复合膜阻湿性能的影响因素研究[J]. 包装工程, 2012, 33(19): 25-31.
- [55] GARCÍA-BETANZOS C I, HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ H, QUINTANAR-GUERRERO D, et al. The evaluation of mechanical, thermal, optical and microstructural properties of edible films with solid lipid nanoparticles-xanthan gum stored at different temperatures and relative humidities[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9: 1756-1768. DOI:10.1007/s11947-016-1757-3.
- [56] ZHANG S L, ZHAO H Y. Preparation and properties of zein-rutin composite nanoparticle/corn starch films[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 169: 385-392. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.04.044.
- [57] VARGAS C G, COSTA T M H, DE OLIVEIRA RIOS A, et al. Comparative study on the properties of films based on red rice (*Oryza glaberrima*) flour and starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 65: 96-106. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.11.006.
- [58] ACOSTA S, CHIRALT A, SANTAMARINA P, et al. Antifungal films based on starch-gelatin blend, containing essential oils[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 233-240. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.05.008.
- [59] 张鹰, 曾少甫. 柚皮果胶可食性膜对猪肉的保鲜效果研究[J]. 食品科技, 2014, 39(12): 264-268. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2014.12.055.
- [60] DASHIPOUR A, RAZAVILAR V, HOSSEINI H, et al. Antioxidant and antimicrobial carboxymethyl cellulose films containing *Zataria multiflora* essential oil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 606-613. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2014.09.006.
- [61] ALTIÖK D, ALTIÖK E, TIHMİNLİÖGLÜ F. Physical, antibacterial and antioxidant properties of chitosan films incorporated with thyme oil for potential wound healing applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2010, 21(7): 2227-2236. DOI:10.1007/s10856-010-4065-x.
- [62] SOUZA M P, VAZ A F M, SILVA H D, et al. Development and characterization of an active chitosan-based film containing quercetin[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8: 2183-2191. DOI:10.1007/s11947-015-1580-2.
- [63] FERREIRA A S, NUNES C, CASTRO A, et al. Influence of grape pomace extract incorporation on chitosan films properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 490-499. DOI:10.1016/j.carbpol.2014.07.032.
- [64] REYES-AVALOS M C, FEMENIA A, MINJARES-FUENTES R, et al. Improvement of the quality and the shelf life of figs (*Ficus carica*) using an alginate-chitosan edible film[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9: 2114-2124. DOI:10.1007/s11947-016-1796-9.
- [65] YANG H, WEN X L, GUO S G, et al. Physical, antioxidant and structural characterization of blend films based on hsian-tso gum (HG) and casein (CAS)[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134: 222-229. DOI:10.1016/j.carbpol.2015.07.021.
- [66] HASHEMI S M B, MOUSAVI KHANEGHAH A, GHADERI GHAFHARROKHI M, et al. Basil-seed gum containing *Origanum vulgare* subsp. viride essential oil as edible coating for fresh cut apricots[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 125: 26-34. DOI:10.1016/j.postharvbio.2016.11.003.
- [67] DU Hengjun, HU Qiuhui, YANG Wenjian, et al. Development, physicochemical characterization and forming mechanism of *Flammulina velutipes* polysaccharide-based edible films[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 152: 214-221. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.07.035.
- [68] 高丹丹. 普鲁兰多糖: 明胶可食性膜的制备、成膜机理及应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012: 22-23.
- [69] BALLESTER-COSTA C, SENDRA E, FERNÁNDEZ-LÓPEZ J, et al. Evaluation of the antibacterial and antioxidant activities of chitosan edible films incorporated with organic essential oils obtained from four *Thymus* species[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53: 3374-3379. DOI:10.1007/s13197-016-2312-y.
- [70] APPENDINIA P, HOTCHKISS J H. Review of antimicrobial food packaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002, 3(2): 113-126.
- [71] 刘敏, 赵浩, 范贵生, 等. 壳聚糖-酪蛋白酸钠可食性抑菌膜结构表征及抑菌性的研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(2): 12-16. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.02.003.
- [72] 曾少甫, 胡长鹰, 刘婧, 等. 壳聚糖-肉桂醛复合抗菌降解膜的制备及性能[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 6-11. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201610002.
- [73] AZEVEDO A N, BUARQUE P R, CRUZ E M O, et al. Response surface methodology for optimisation of edible chitosan coating formulations incorporating essential oil against several foodborne pathogenic bacteria[J]. Food Control, 2014, 43: 1-9. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.02.033.
- [74] 陈佩华. 魔芋葡甘聚糖/壳聚糖可食性复配膜性质及其应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 37-47.
- [75] SUPPAKUL P, BOONLERT R, BUAPHET W, et al. Efficacy of superior antioxidant Indian gooseberry extract-incorporated edible Indian gooseberry puree/methylcellulose composite films on enhancing the shelf life of roasted cashew nut[J]. Food Control, 2016, 69: 51-60. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.04.033.
- [76] 李佳, 丁俏羽, 陈珊珊, 等. 褐藻胶与茶多酚可食性膜对冬枣保鲜研究[J]. 食品科技, 2013, 38(10): 46-50.
- [77] 谢建华, 谢丙清, 郭巧玲, 等. 魔芋葡甘聚糖-乳清蛋白复合膜在琯溪蜜柚中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(1): 76-81. DOI:10.3969/j.issn.2095-6002.2017.01.012.
- [78] 匡衡峰, 胡长鹰, 温晓敏, 等. 纳米ZnO/壳聚糖复合膜的性能及在冷鲜猪肉保藏中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(4): 251-256. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201704040.
- [79] 张慧芸, 郭新宇. 丁香精油-壳聚糖复合可食性膜对生肉糜保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(18): 196-200. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201418038.