

可食性降解抗菌保鲜膜的研究进展

周三九, 李月明, 韩德权, 杜易阳, 于艳梅, 李 迪, 孙庆申*

(黑龙江大学生命科学学院 微生物黑龙江省高校重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘 要: 食品贮藏过程中微生物引起的腐败是影响食品货架期的最重要的因素之一。为此, 作为食品流通领域的重要成员, 食品包装材料不仅应具有美观商品、便于运输等优点, 对一些包装材料还要求具有抗菌、延长食品货架期的功能, 并且本身具有安全性和可食用性, 这就推动了人们对食品抗菌保鲜膜领域的研究。本文主要介绍了可食性、可降解性(抗菌)保鲜膜的概念、种类(多糖类、蛋白质类、脂类、复合膜类), 抗菌剂的种类(有机抗菌剂、无机抗菌剂、天然抗菌剂、细菌素等); 阐述了可食性、可降解抗菌保鲜膜的国内外研究现状; 展望了可食性降解抗菌保鲜膜的未来发展趋势。本文期望为抗菌保鲜膜领域的研究提供一些新的思路。

关键词: 可食性; 可降解性; 抗菌保鲜膜; 研究现状; 发展趋势

The research progress of edible preservative films with biodegradable and antimicrobial features

ZHOU San-Jiu, LI Yue-Ming, HAN De-Quan, DU Yi-Yang, YU Yan-Mei, LI Di, SUN Qing-Shen

(University Key Laboratory of Microbiology, College of Life Science, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

ABSTRACT: Food spoilage caused by microorganisms during food storage is one of the most factors affecting the shelf life of the food. Therefore, as an important member in food circulation process, food packaging materials should not only beautify merchandise, facilitate to transport, etc., for some packaging materials, anti-bacterial and extend food shelf life functions are also required, in addition to the safety and edible features, which promoted the study on food preservative films with antibacterial features. This review stated the concept and types of edible and biodegradable (antibacterial) preservative films (polysaccharides, proteins, lipids, and two or more of them compound-based films), the type of antibacterial agent (organic, inorganic, natural antibacterial agents, bacteriocins, etc.). The research status and prospect of future development trends of the preservative films with antimicrobial, edible, and biodegradable were also stated. This article aimed to provide some new ideas for the research in the field of antibacterial and preservative films.

KEY WORDS: edibility; biodegradability; refreshing films with antimicrobial features; present progress; prospective

基金项目: 黑龙江大学杰出青年科学基金项目(201105)、国家自然科学基金项目(31000773)、教育部(黑龙江大学)功能无机材料化学重点实验室开放项目

Fund: Supported by Prominent Young Science Fund Project of Heilongjiang University (201105); National Natural Science Foundation of China (31000773); Open Item of Key Laboratory of Functional Inorganic Material Chemistry (Heilongjiang University), Ministry of Education

*通讯作者: 孙庆申, 副教授, 主要研究方向为功能高分子材料、保健食品材料。E-mail: sunqingshen@hlju.edu.cn

*Corresponding author: SUN Qing-Shen, Associate Professor, College of Life Science, Heilongjiang University, Harbin 150080, China. E-mail: sunqingshen@hlju.edu.cn

1 引言

近几年来, 食品安全越来越受到人们的重视, 人们试图通过各种方式降低食品安全隐患。食品包装材料作为食品流通领域的重要成员之一, 不仅具有美观商品、便于运输等优点, 对有一些包装材料还要求具有保藏、延长货架期的效果, 这就推动了食品保鲜膜领域的研究, 食品保鲜膜的安全性及功能性随即成为研究的热点之一。市面上销售的保鲜膜种类繁多, 主要有三种, 分别是聚乙烯(PE)膜、聚氯乙烯(PVC)膜和聚偏二氯乙烯(PVDC)保鲜膜 3 种。带有 PE 和 PVDC 标识的保鲜膜应用比较广泛, 而 PVC 标识的包装膜在加热过程中不太稳定, 会释放出致癌物质, 对人体危害较大。这三类保鲜膜虽然具有一定的保鲜功能, 但是它们都不具备抗菌性和生物可降解性, 是造成地球白色污染的原因之一。因此, 研究无毒且具有一定保鲜功能的可食性降解抗菌保鲜膜成为热点。

本文就目前具有可食性、可降解性及抗菌性食品保鲜膜的研究现状及未来发展趋势进行了阐述, 为该领域的研究提供有价值的参考资料。

2 可食性降解保鲜膜的概念与种类

可食性降解保鲜膜是指利用生物可降解的物质为原料制成的一种可食的、具有一定的包装保护功能和保鲜功能的薄膜^[1-6]。可食性降解膜的成膜材料主要包括多糖类(壳聚糖、褐藻酸钠、魔芋葡甘聚糖、淀粉等^[7-12])、蛋白质类(大豆分离蛋白、小麦筋蛋白、胶原蛋白、玉米醇溶蛋白、酪蛋白、明胶等^[8, 13, 14])、脂类(蜡类、乙酰单甘酯、蔗糖脂肪酸酯、硬脂酸单甘油酯等^[15, 16])以及它们的复合体系^[8, 13, 17]。复合膜一般是由多糖、蛋白质、脂质类中的 2-3 种经处理复合而成^[9]。复合膜研究较多的有多糖-蛋白质复合膜或多糖-淀粉复合膜^[8], 多糖与蛋白质不仅能在性能上取长补短、相互协同, 而且具有增稠和凝胶作用, 因而多糖-蛋白质复合膜具有更加优良功能特性。可食性降解保鲜膜主要通过分子间的相互作用交联成膜, 通过在食品表面或内部界面上形成一层物理屏障, 可起到保水、调节内部气体成分的作用, 同时还可以负载特定的物质改善膜的功能性质。可食性降解膜具有可食、可降解、无污染等特点^[1, 10], 其中多糖膜由于具有良好的机械强度和屏蔽水蒸汽的性能成为可食性降解膜的重要基质成分^[9-12]。

3 可食性降解抗菌保鲜膜的概念与抗菌剂的种类

3.1 可食性降解抗菌保鲜膜的概念

可食性降解抗菌保鲜膜是指利用可食的、生物可降解的材料为基质, 向其中添加适量的抗菌剂, 通过抗菌剂的缓释作用和光催化等作用达到抗菌、保鲜目的的一种功能

薄膜。可食性降解抗菌保鲜膜具有一定的包装保护功能, 可作为阻隔层控制水分迁移、脂肪氧化和各种物质的损失等来保持食品的性状, 其中的抗菌剂又可以杀灭食品中的有害微生物, 从而延长货架期^[12, 18, 19]。

3.2 抗菌剂的种类

(1)有机抗菌剂: 主要包括醇类、酚类、有机金属类、季胺盐类等。其优点是起效快、性质较稳定、操控性能好, 对微生物具有特异性而被迅速推广; 缺点是微生物容易出现耐药性及耐热性差等^[20]。

(2)无机抗菌剂: 无机抗菌剂分为两大类, 一类是无机化合物中含有抗菌性离子, 如银、铜、锌等; 另一类是光催化类抗菌剂, 如 TiO_2 、 ZnO 等, 此类抗菌剂耐热性较一般无机抗菌剂高, 但必须有紫外线照射、氧气或水的存在才能起到杀菌作用^[21]。无机抗菌剂具有无毒或低毒、广谱抗菌、长效且无耐药问题等优点; 但是无机抗菌剂的缺点是成本高、易氧化变色等^[20]。

(3)天然抗菌剂: 天然抗菌剂是一类直接从动植物中提取的抗菌剂, 如: 壳聚糖、薄荷等。天然抗菌剂有较好的安全性和高效性, 但是因其不耐热耐高压, 因而导致它的应用范围受到局限^[2, 5, 6, 22, 23]。

(4)细菌素: 细菌素是细菌代谢过程中产生的抑菌物质, 一般是多肽或蛋白质, 如乳酸链球菌素(Nisin)等, 具有耐高温、不会产生抗药性、广谱杀菌等作用^[24]。

4 国内外可食性降解抗菌保鲜膜的研究现状

4.1 国内外可食性降解抗菌保鲜膜的研究现状

近年来, 在发达国家塑料食品包装材料已逐渐被无毒、可食性、易降解的包装材料取而代之。我国也逐步发展易挥发、可再利用的包装材料, 以生物可降解的材料为基质制备可食性包装膜代替目前的塑料薄膜成为当前研究的一个热点, 其产品具有广阔的市场消费前景。在国外, 在 20 世纪 90 年代初, 意大利就明确表示禁止使用塑料食品包装袋。美国、英国等国家都在开发可食性食品包装薄膜, 已经有了实际应用的成绩。美国已申请了全能保鲜膜液的专利, 主要用于水果的保鲜, 该膜液不仅能防止水果褪色, 抑制细菌繁殖, 还能防止水果皱缩, 保持果肉质度不变。可食性降解保鲜膜多以涂抹、喷洒、浸渍、包裹等方式用于果蔬表面, 对水分、气体(O_2 、 CO_2)或溶质的迁移有一定的阻隔作用, 从而保证食品品质, 延长食品的保质期。英国科学家研制成一种由蔗糖、淀粉、脂肪酸的聚酯物制成的可食涂膜保鲜剂, 采用喷涂或浸渍方法涂于苹果、柑橘、葡萄、番茄等果蔬表面, 可以延长这些水果的贮藏期。用于制备可食性降解保鲜膜的基质应用较多的有: 壳聚糖^[25-28]、魔芋葡甘聚糖、淀粉^[9-12]、明胶^[28]、羧甲基纤维素^[14, 29]、大豆分离蛋白^[8, 13, 14]、玉米醇溶蛋白^[30]、胶原蛋白

[31]、海藻酸钠^[2, 32, 33]等,在果蔬保鲜方面,这些基质材料制备的单一膜或者复合膜以自发气调为主要保鲜原理,它具备一定的微孔结构,覆盖果蔬表面可控制果蔬的细胞呼吸从而起到保鲜作用。

壳聚糖和淀粉具有好的相容性和成膜性,而且壳聚糖-淀粉膜有优良的抗拉强度、断裂伸长率和透明度,因此研究的人较多^[9, 10, 12]。在国内,申景博等^[34]用壳聚糖、淀粉、聚乙烯醇为原料,制备了壳聚糖-淀粉-聚乙烯醇复合膜,并对薄膜的抗拉强度、断裂伸长率和气体阻隔性进行了测试。实验表明:加入聚乙烯醇后,复合膜的抗拉强度和断裂伸长率都得到很大的改善,二者分别达到 62 MPa 和 118%。杜易阳等^[35]研究了壳聚糖-淀粉可食性降解膜,试验的结果表明,当甘油含量为 0.4%时,壳聚糖和淀粉的质量比为 4:1 时,复合膜的综合性能最好。李丽杰等^[36]将木薯淀粉和壳聚糖混合制成木薯淀粉-壳聚糖复合膜,测定了复合膜的力学性质和透光率、透水率,结果表明:木薯淀粉和壳聚糖比例为 1.5:1 时,复合膜的力学性能、透光性、透水性均较好;用复合膜对羊肉进行保鲜,结果表明与未包复合膜的对照组相比,复合膜组羊肉在 4℃下贮藏 10 天后,其失水率、丙二醛值及挥发性盐基总氮值均低于对照组。王佳宏等^[37]用 5%淀粉、2%羧甲基纤维素钠(CMC-Na)、3.5%甘油、1.5% L-半胱氨酸(L-cys)混合制得复合性可食涂膜,然后用此膜对鲜切苹果进行保鲜,结果表明:此复合膜能降低鲜切苹果的呼吸强度,并且抑制 PPO 的酶活和酶促褐变,苹果的 SSC、VC、游离酚含量比对照组高,苹果的外观保持较好,其营养和质地也保持较好。

多糖与蛋白质因为能在性能上取长补短、相互协同,因而多糖-蛋白质复合膜的综合性能更加优良。高丹丹等^[38]用普鲁兰多糖和明胶制备一种速溶的普鲁兰多糖-明胶可食性膜,研究发现当普鲁兰多糖和明胶按一定比例混合后,复合膜的氧气透过率达到 0.15 mL/(m²·d)、复合膜有较大的抗拉强度和低的水蒸气透过率。赵欣等^[39]将大豆分离蛋白和水溶性大豆多糖混合制备复合膜,并加入甘油、海藻酸钠、Ca²⁺等改善膜的性能,研究发现当大豆分离蛋白与大豆多糖质量比为 1:7、甘油 2%、海藻酸钠 4%、Ca²⁺浓度为 1 mol/L 的条件下,复合膜的综合性能最好。

多糖和脂类也有良好的成膜性和综合性能。赖明耀等^[40]以魔芋葡甘聚糖和蜂蜡为原料制备复合膜,分析了影响复合膜力学性能的因素(魔芋葡甘聚糖/蜂蜡配比、甘油添加量、烘干温度),研究结果表明,当魔芋葡甘聚糖/蜂蜡为 6.14:1、甘油含量为 0.42%、烘干温度是 70.71℃时,复合膜的拉伸强度可以达到 41.78 MPa。

以蛋白质为基质的膜因为具有较高的营养价值、阻气性和透明性强,所以近年来研究的人较多。逢瑞珏^[41]将 Na₂SO₃、谷氨酰胺转氨酶和大豆分离蛋白混在一起制作大豆分离蛋白膜,结果表明:当大豆分离蛋白含量为 5.0%、

甘油 1.5%、Na₂SO₃ 0.1%、谷氨酰胺转氨酶 0.2%时,大豆分离蛋白膜综合性能最好。陈义勇等^[42]将玉米醇溶蛋白与蔗糖、甘油混合制成涂膜剂,然后用此涂膜剂对小番茄进行涂抹保鲜。结果表明,此涂膜剂可以延长小番茄储藏期,并且可以减少小番茄在储藏期间营养成分的损耗。

以上这些研究结果表明,可食性降解保鲜膜具有一定的防腐和保鲜能力,利用可食性降解膜对果蔬保鲜具有较好的应用前景。但是由于可食性降解保鲜膜的杀菌能力较弱,而田间采收的果蔬产品携带的微生物一般较多,通过可食性降解保鲜膜气本身的气调作用和较弱的杀菌能力不能有效地杀灭果蔬表面的腐败微生物,因此,可食性降解抗菌保鲜膜日益成为人们研究的焦点。

4.2 国内外可食性降解抗菌保鲜膜的研究现状

可食性降解抗菌保鲜膜是在可食性降解保鲜膜的基础上添加一定浓度的抗菌剂而制成的,它不仅无毒可以降解,而且有很强的抗菌保鲜功能,因此目前研究的人较多。常用的可食性降解保鲜膜的基质主要有:壳聚糖、淀粉、羧甲基纤维素、魔芋葡甘聚糖、谷朊粉、胶原蛋白等。在可食性降解保鲜膜中的常用抗菌剂主要是天然类抗菌剂和无机型抗菌剂,因为它们抗菌效果好并且无毒,天然抗菌剂如: Nisin、那他霉素、溶菌酶、精油类(牛至油、大蒜素油等)、多酚类(茶多酚、石榴多酚、香芹酚等);无机抗菌剂如:纳米氧化锌、TiO₂、AgNO₃ 等。

天然抗菌剂由于有较好的安全性和杀菌效果好等特点,因此近年来将天然抗菌剂运用于可食性降解膜中的较为多见。在国外, Greta Peretto 等^[5]将香芹酚、肉桂酸甲酯和草莓浆果混合制备可食性膜,然后将此膜用于草莓的保鲜。结果表明:与不作处理的草莓相比,草莓在 90%相对湿度、10℃环境中保存 10 天后,能够明显的减少腐烂率,草莓果实也比较硬,其外观颜色也很鲜艳。主要作用是因为膜含有的香芹酚和肉桂酸甲酯中的天然抗菌物质缓慢的释放出来,从而起到杀菌的作用。有研究以乳清蛋白作为基质,将溶菌酶、Nisin(乳酸链球菌素)、EDTA、精油等添加进去混合制成可食性降解保鲜薄膜,结果表明此膜既能有效的抑制革兰氏阳性菌又能有效的抑制革兰氏阴性菌^[43-46]。

在国内,平川等^[47]将 Nisin、那他霉素和溶菌酶添加到乳清蛋白可食性降解膜中,结果表明:在不同的抑菌剂组合下,膜的抑菌效果也不同,抑菌剂浓度越大,膜的抑菌效果越强,其中当 Nisin 浓度在 0.35%、溶菌酶浓度在 0.08%时,膜的抑菌效果最好。膜的溶解性在酸性环境中高于碱性环境。社会云^[48]等用壳聚糖、溶菌酶、牛至油和大豆分离蛋白做成大豆分离蛋白膜,并研究了此复合膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、酿酒酵母和黑曲霉的抑菌效果。结果表明,在大豆分离蛋白膜中加入壳聚糖、溶菌酶、牛至油三种抗菌剂后,该膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、

酿酒酵母、黑曲霉都有一定程度的抑制作用。牛至油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制作用大于壳聚糖和溶菌酶;壳聚糖对酿酒酵母的抑制作用大于牛至油和溶菌酶;牛至油对黑曲霉的抑制作用大于壳聚糖和溶菌酶。李江林等^[49]用可溶性淀粉、CMC - Na、单甘酯制成可食性降解膜,并用此可食性降解膜和石榴皮、Nisin 复配,对黑椒烟熏牛肉保鲜效果进行研究。结果表明,复合膜对黑椒烟熏牛肉品质影响最大,其次为石榴皮提取液,Nisin 排在第 3,浸渍时间排在第 4。当石榴皮提取液含量为 1%、Nisin 含量 0.04%、浸渍时间 2 min、复合膜复配达到最佳效果,分别在 25 ℃ 和 0~4 ℃ 用复配膜保鲜黑椒烟熏牛肉,结果发现黑椒烟熏牛肉的贮藏期分别达到 8 天和 30 天。

无机抗菌剂因为具有非常广谱的杀菌效果,而且杀菌率高、耐热性好、无毒或低毒,所以也日益成为人们研究的对象。在国内,杨远谊^[20]将 TiO_2 加到壳聚糖膜中制备壳聚糖/纳米 TiO_2 抗菌保鲜膜,并用此膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行抑菌实验,结果表明此膜与大肠杆菌和金黄色葡萄球菌菌液接触 24 h 后,对二种菌的抗菌率分别为 98.3% 和 95.5%,接触 48 h 后对二种菌的抗菌率高达 99.42%。

由以上可以看出,可食性降解抗菌保鲜膜的研究主要朝有多种成膜基质的复合膜方向发展;天然抗菌剂的添加主要是以多种抗菌剂混合形式添加,而无机抗菌剂主要是单一添加的较为多见。

5 可食性降解抗菌保鲜膜的未来发展趋势

5.1 可食性降解抗菌保鲜膜的膜基质和抗菌剂将向复合型发展

目前可食性降解抗菌保鲜膜的基质由原来的单一型向多种复合型发展,如:以前研究单纯的壳聚糖膜的较多,而现在向复合型的壳聚糖-淀粉复合膜、壳聚糖-明胶复合膜等方向发展;可食性降解抗菌保鲜膜中抗菌剂的种类也由原来的单一型向复合抗菌剂发展,每种抗菌剂都有一定的抗菌范围,这样结合多种抗菌剂就能杀灭更多种的微生物^[2]。例如,本实验室正在研制的纳米氧化锌-壳聚糖-淀粉复合膜,研究发现加入低浓度的纳米氧化锌(0.2%)后,复合膜对金黄色葡萄球菌(革兰氏阳性菌)和大肠杆菌(革兰氏阴性菌)的抑制效果较好,但对黑曲霉的抑制效果不明显,只有当纳米氧化锌含量在 0.6% 时,复合膜对黑曲霉才有非常显著的抑制效果。而在复合膜中添加 0.04% 的那他霉素后,复合膜对黑曲霉就有很显著的抑菌效果,但对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌却没有明显的抑制作用,因此可以尝试着将这两种抗菌剂一起加入可食性降解抗菌保鲜膜中,这样两种抗菌剂在低浓度时复合膜就具有很广谱的杀菌效果了。复合型可食性降解抗菌膜一般结合了各膜基质和抗菌剂的优点,能更好的应用于食品保鲜。

5.2 提高可食性降解抗菌保鲜膜的综合性能

和市售的聚乙烯类保鲜膜相比,目前可食性降解抗菌保鲜膜普遍存在着断裂伸长率小,易碎易断、保水性差(水蒸气透过率较高)等缺点^[8, 26, 28, 50, 51],因此可食性降解抗菌保鲜膜未来的发展趋势是逐步提高膜的断裂伸长率和保水性两方面,如在膜中添加一定量的聚乙烯醇提高膜的断裂伸长率^[52],添加一定量的山梨糖醇等提高膜的保水性。

5.3 将微胶囊化技术应用于可食性降解抗菌保鲜膜

有些天然抗菌剂有一定的抗菌效果,但是气味刺鼻、溶解性差、成膜性差,如大蒜素,因此为了提高大蒜素的利用效果,可以以油性大蒜素为囊心,明胶和惰性粉末为壁材,做成大蒜素微胶囊,然后再添加到可食性降解膜液中制备成膜。

5.4 加强研究抗菌剂的稳定性和安全性问题

未来的可食性降解抗菌保鲜膜在提高抗菌作用的同时,也要加强研究抗菌剂在保鲜膜中的稳定性和安全性问题,因为有些抗菌剂具有迁移性,能缓慢地迁移至食品中,从而造成对人体的危害。

5.5 由小规模生产向大型自动化生产规模发展

目前我国可食性降解抗菌保鲜膜大多数只局限于实验室小规模生产,缺乏大型自动化生产规模,这种现状大大地影响了可食性降解抗菌保鲜膜的发展。随着人们对可食性降解抗菌保鲜膜的需求量的不断增大,发展可食性降解抗菌保鲜膜的大规模自动化生产将是未来的发展趋势。

参考文献

- [1] MA Del Nobile AC, Buonocore GG, Incoronato AL, *et al.* Panza: Active packaging by extrusion processing of recyclable and biodegradable polymers [J]. *J Food Eng*, 2009, (3): 6.
- [2] Raybaudi-Massilia RM, Mosqueda-Melgar J, Martin-Belloso O, Edible alginate-based coating as carrier of antimicrobials to improve shelf-life and safety of fresh-cut melon [J]. *Int J Food Microbiol*, 2008, 121(3): 313-327.
- [3] Oms-Oliu G, Soliva-Fortuny R, Martin-Belloso O. Edible coatings with antibrowning agents to maintain sensory quality and antioxidant properties of fresh-cut pears [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2008, 50(1): 87-94.
- [4] Fajardo P, Martins JT, Fuciños C, *et al.* Evaluation of a chitosan-based edible film as carrier of natamycin to improve the storability of Saloio cheese [J]. *J Food Eng*, 2010, 101(4): 349-356.
- [5] Greta Peretto WXD, Roberto J. Avena-Bustillos, *et al.* Increasing strawberry shelf-life with carvacrol and methyl cinnamate antimicrobial vapors released from edible film [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2014, 89: 8.
- [6] Bajpai SK, Chand N, Chaurasia V. Investigation of water vapor permeability and antimicrobial property of zinc oxide nanoparticles-loaded chitosan-based edible film [J]. *J Appl Polym Sci*, 2010, 115(2): 674-683.
- [7] Khalid Ziani JO, Veronique C, Juan IM. Effect of the presence of glycerol

- and Tween 20 on the chemical and physical properties of films based on chitosan with different degree of deacetylation [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2008, 41: 7.
- [8] Jia DY, Kai Y. Water vapor barrier and mechanical properties of konjac glucomannan-chitosan-soy protein isolate edible film [J]. *Food Bioprocess*, 2009, 87: 4.
- [9] Xu YX, Kim KM, Hanna MA, *et al*. Chitosan-starch composite film: preparation and characterization [J]. *Ind Crop Prod*, 2005, 21(2): 185-192.
- [10] Bourtoom T, Chinnan MS. Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2008, 41(9): 1633-1641.
- [11] Jayasekara R, Harding I, Bowater I, *et al*. Preparation, surface modification and characterisation of solution cast starch PVA blended films [J]. *Polym Test*, 2004, 23(1): 17-27.
- [12] Zhai M, Zhao L, Yoshii F, *et al*. Study on antibacterial starch/chitosan blend film formed under the action of irradiation [J]. *Carbohydr Polym*, 2004, 57(1): 83-88.
- [13] Sun QS, Wang P, Du YY, *et al*. Characterization and evaluation of the Ag⁺-loaded soy protein isolate-based bactericidal film-forming dispersion and films [J]. *J Food Sci*, 2011, 76(6): 6.
- [14] Su JF, Yuan XY, Huang Z, *et al*. Physicochemical properties of soy protein isolate/carboxymethyl cellulose blend films crosslinked by Maillard reactions: color, transparency and heat-sealing ability [J]. *Mat Sci Eng C, Mat Biol Appl*, 2012, 32(1): 40-46.
- [15] Jayakumar R, Nwe N, Tokura S, *et al*. Sulfated chitin and chitosan as novel biomaterials [J]. *Int J Biol Macromol*, 2007, 40(3): 175-181.
- [16] Liu Y, He T, Gao C. Surface modification of poly(ethylene terephthalate) via hydrolysis and layer-by-layer assembly of chitosan and chondroitin sulfate to construct cytocompatible layer for human endothelial cells [J]. *Colloid Surface B*, 2005, 46(2): 117-126.
- [17] 郭丛珊, 张丽叶. 含茶多酚大豆分离蛋白抗菌膜的制备及其性能和保鲜效果[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)* 2011, 38(4): 104-109.
- Guo CS, Zhang LY. The preparation and properties and preservation effect of antibacterial film of soybean protein isolation [J]. *J Beijing Univ Chem Technol (Nat Sci)* 2011, 38(4): 104-109.
- [18] Zhao L, Chu PK, Zhang Y, *et al*. Antibacterial coatings on titanium implants [J]. *J Biomed Mater Res Part B, Appl Biomater*, 2009, 91(1): 470-480.
- [19] Fu J, Ji J, Yuan W, *et al*. Construction of anti-adhesive and antibacterial multilayer films via layer-by-layer assembly of heparin and chitosan [J]. *Biomaterials* 2005, 26(33): 6684-6692.
- [20] 杨远谊. 抗菌保鲜膜研究及进展[J]. *包装工程*, 2007, 28(6): 201-203.
- Yang YY. Advance in research of antimicrobial preservative film [J]. *Pack Eng*, 2007, 28(6): 201-203.
- [21] 周亮. 抗菌纸的研究进展[J]. *包装工程*, 2006, 26(5): 103-105.
- Zhou L. Progress in research of antibacterial papers [J]. *Pack Eng*, 2006, 26(5): 103-105.
- [22] Joerger RD. Antimicrobial films for food applications: a quantitative analysis of their effectiveness [J]. *Pack Technol Sci*, 2007, 20(4): 231-273.
- [23] Mantilla N, Castell-Perez ME, Gomes C, *et al*. Multilayered antimicrobial edible coating and its effect on quality and shelf-life of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*) [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2013, 51(1): 37-43.
- [24] Hanušová K, Štátná M, Votavová L, *et al*. Polymer films releasing nisin and/or natamycin from polyvinylidene chloride lacquer coating: Nisin and natamycin migration, efficiency in cheese packaging [J]. *J Food Eng*, 2010, 99(4): 491-496.
- [25] Haque P, Mustafa AI, Khan MA. Development and modification of ethylene glycol grafted chitosan films by photocuring [J]. *Nucl Instrum Meth Phys Res*, 2005, 236(1-4): 314-317.
- [26] Moreno-Osorio L, Garcia M, Villalobos-Carvajal R. Effect of polygodial on mechanical, optical and barrier properties of chitosan films [J]. *J Food Process Pres*, 2010, 34(2): 219-234.
- [27] Sionkowska A, Kaczmarek H, Wisniewski M, *et al*. The influence of UV irradiation on the surface of chitosan films [J]. *Surf Sci*, 2006, 600(18): 3775-3779.
- [28] Kołodziejewska I, Piotrowska B. The water vapour permeability, mechanical properties and solubility of fish gelatin-chitosan films modified with transglutaminase or 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl) carbodiimide (EDC) and plasticized with glycerol [J]. *Food Chem*, 2007, 103(2): 295-300.
- [29] Pastor C, Sánchez-González L, Marcilla A, *et al*. Quality and safety of table grapes coated with hydroxypropylmethylcellulose edible coatings containing propolis extract [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2011, 60(1): 64-70.
- [30] Xu H, Chai YW, Zhang GY. Synergistic Effect of Oleic Acid and Glycerol on Zein Film Plasticization [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(40): 10075-10081.
- [31] Liu Y, Ren L, Wang YJ. A novel collagen film with micro-rough surface structure for corneal epithelial repair fabricated by freeze drying technique [J]. *Appl Surf Sci*, 2014, 301: 396-400.
- [32] Knill CJ, Kennedy JF, Mistry J, *et al*. Alginate fibres modified with unhydrolysed and hydrolysed chitosans for wound dressings [J]. *Carbohydr Polym*, 2004, 55(1): 65-76.
- [33] George M, Abraham TE. Polyionic hydrocolloids for the intestinal delivery of protein drugs: alginate and chitosan—a review [J]. *J Control Release*, 2006, 114(1): 1-14.
- [34] 申景博, 韩永生, 壳聚糖-淀粉-聚乙烯醇共混改善壳聚糖膜性能的研究[J]. *包装工程*, 2007, 28(12): 52-56.
- Shen JB, Han YS. Study on Improving Properties of Chitosan Film by Blending Chitosan, Starch and PVA [J]. *Pack Eng*, 2007, 28(12): 52-56.
- [35] 杜易阳, 孙庆申, 韩德权, 等. 壳聚糖淀粉膜的研制及结构性能分析[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(12): 276-279.
- Du YY, Sun QS, Han DQ, *et al*. Preparation and structural evaluation of chitosan-starch compound film [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2011, 32(12): 276-279.
- [36] 李丽杰, 王越男, 李艳辉. 可食性复合膜的制备及其在羊肉保鲜中的应用[J]. *食品科学*, 2013, 34(2): 317-320.
- Li LJ, Wang YN, Li YH. Preparation of edible composite film and its application to preserve mutton [J]. *Food Sci*, 2013, 34(2): 317-320.
- [37] 王佳宏, 刘彩虹, 季晓钊, 等. 一种可食膜对鲜切苹果的生理及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(10): 332-335.
- Wang JH, Liu CH, Ji XF, *et al*. Effect of a kind of edible film on the physiology and quality of fresh-cut apples [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(10): 332-335.
- [38] 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.
- Gao DD, Xu XL, Jiang LZ, *et al*. Properties of Pullulan-Gelatin Compo-

- site Films [J]. Food Sci, 2014, 35(1): 69–73.
- [39] 赵欣, 管骅, 大豆分离蛋白-水溶性大豆多糖可食性复合膜的制备与性质[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(7): 44–49.
- Zhao X, Guan X. The preparation and properties of soybean protein isolation - water soluble soybean polysaccharides edible composite film [J]. Food Ferment Ind, 2013, 39(7): 44–49.
- [40] 赖明耀, 林好, 汪秀妹, 等. 葡甘聚糖/蜂蜡复合膜工艺优化研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 137–142.
- Lai MY, Lin H, Wang XM, *et al.* Study on optimization of konjac glucomannan(KGM)-beeswax(BW)composite membrane [J]. Food Mach, 2013, 29(6): 137–142.
- [41] 逢瑞羽. 可食性大豆分离蛋白成膜工艺研究[J]. 粮油科技, 2005, 5(4): 51–54.
- Feng RY. The film-forming process research of edible soybean separation protein [J]. Sci Technol Grain Oil, 2005, 5(4): 51–54.
- [42] 陈义勇, 邓克权, 王伟, 等. 玉米醇溶蛋白膜的制备及其在保鲜中的应用[J]. 常熟理工学院学报 (自然科学版), 2007, 21(10): 75–84.
- Chen YY, Deng KQ, Wang W, *et al.* The preparation of zein film and its application in preservation [J]. J Changshu Inst Technol (Nat Sci), 2007, 21(10): 75–84.
- [43] Murillo-Martinez MM, Tello-Solis SR, Garcia-Sanchez MA, *et al.* Antimicrobial activity and hydrophobicity of edible whey protein isolate films formulated with nisin and/or glucose oxidase [J]. J Food Sci, 2013, 78(4): M560–566.
- [44] Fernandez-Pan I, Royo M, Ignacio Mate J. Antimicrobial activity of whey protein isolate edible films with essential oils against food spoilers and foodborne pathogens [J]. J Food Sci 2012, 77(7): M383–390.
- [45] Ramos OL, Pereira JO, Silva SI, *et al.* Evaluation of antimicrobial edible coatings from a whey protein isolate base to improve the shelf life of cheese [J]. J Dairy Sci, 2012, 95(11): 6282–6292.
- [46] Zinoviadou KG, Koutsoumanis KP, Biliaderis CG. Physico-chemical properties of whey protein isolate films containing oregano oil and their antimicrobial action against spoilage flora of fresh beef [J]. Meat Sci, 2009, 82(3): 338–345.
- [47] 平川, 王昆, 马玲. 乳清蛋白可食用膜抑菌性、溶解性研究[J]. 肉类工业, 2012, (6): 35–37.
- Ping C, Wang K, Ma L. Antimicrobial activity and solubility of whey protein edible film [J]. Meat Ind, 2012, (6): 35–37.
- [48] 社会云, 赵寿经, 王新伟, 等. 壳聚糖、溶菌酶和牛至油对大豆分离蛋白膜抑菌效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(1): 52–56.
- Du HY, Zhao SJ, Wang XW, *et al.* The influence of bacteriostatic effect on soybean separation protein membrane with Chitosan, lysozyme and oregano oil [J]. Food Ferment Ind, 2011, 37(1): 52–56.
- [49] 李江林, 贾刚, 陈勇源, 等. 石榴皮在黑椒烟熏牛肉涂膜保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 309–313.
- Li JL, Jia G, Chen YY, *et al.* Application of coating preservation of smoked beef with black pepper in the pomegranate peel [J]. Sci Technol Food Ind, 2014, 35(5): 309–313.
- [50] Yu S, Mi F, Shyu S, *et al.* Miscibility, mechanical characteristic and platelet adhesion of 6-O-carboxymethylchitosan/polyurethane semi-IPN membranes [J]. J Membrane Sci, 2006, 276(1-2): 68–80.
- [51] Mariniello L, Di Pierro P, Esposito C, *et al.* Preparation and mechanical properties of edible pectin-soy flour films obtained in the absence or presence of transglutaminase [J]. J Biotechnol, 2003, 102(2): 191–198.
- [52] Zhu S, Qian F, Zhang Y, *et al.* Synthesis and characterization of PEG modified N-trimethylaminoethylmethacrylate chitosan nanoparticles [J]. Euro Polym J, 2007, 43(6): 2244–2253.

(责任编辑: 白洪健)

作者简介



周三九, 硕士研究生, 主要研究方向为可食性抗菌保鲜膜。
E-mail: jiujiu729@163.com



孙庆申, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能高分子材料、保健食品材料。
E-mail: sunqingshen@hlju.edu.cn;
kejiansqs@163.com