

纳米银抗菌包装膜的制备及其保藏应用研究进展

高红芳

(渭南职业技术学院,陕西 渭南 714026)

摘要: 纳米银由于具有显著的表面效应、量子尺寸效应、超强的活性以及杀菌作用被广泛应用于食品包装领域。本文综述了纳米银抗菌包装膜的制备方法及其在食品保藏中的应用,分析了抗菌膜中银在食品模拟液以及真实食品中的释放特性,讨论了抗菌膜用于食品保藏的安全性,指出了抗菌膜未来的研究重点和发展趋势, 以为纳米银抗菌包装膜在食品保藏中的应用提供一定的理论基础和技术参考。

关键词: 纳米银;抗菌膜;食品保藏;迁移

Research Progress on Preparation and Preservation of Nanosilver Antibacterial Packaging Film

GAO Hong-fang

(Weinan Vocational & Technical College, Weinan 714026, China)

Abstract: Nanosilver has been widely used in food packaging due to its remarkable surface properties, quantum size effect, super activity and bactericidal function. In this study, the preparation method of nanosilver antibacterial packaging film and its application in food preservation were reviewed. The release characteristics of silver from film into food simulation liquid or real food were analyzed. Safety of the antibacterial film in food preservation was discussed. The research emphasis and development trend of the antibacterial film in future were pointed out in order to provide a certain theoretical basis and technical reference for food preservation application.

Key words: nanosilver; antibacterial packaging film; food preservation; migration

中图分类号:TS206.4

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2020.05.035

纳米无机抗菌剂是一种新型抗菌剂,与有机抗菌剂相比,具有广谱、耐久、安全的特点。在无机抗菌剂中,纳米银因其毒性低、抗菌活性高、抗菌谱广等特点,已得到广泛应用。纳米银对细菌、酵母菌、真菌等都具有较强的抗菌性。其抗菌机理为纳米银表面高活性的银或银离子可使菌体的蛋白酶失活,破坏细胞膜的渗透性,导致细胞凋零死亡^[1]。

纳米银作为食品抗菌包装材料在很多国家已经商业化,并开始使用。近年来,纳米银聚合物复合膜作为食品抗菌包装材料的一种,其研究备受关注。纳米银粒子的添加可以改善包装膜材料的机械性能、阻隔性能、热稳定性、光学特性以及增强膜的抗菌性,在食品保藏中取得了良好的效果。但是,纳米银在促进食品包装业发展的同时,也存在着安全隐患。目前,对纳

基金项目:陕西省教育厅专项科研项目(19JK0304);渭南市科技计划项目(2019-ZDYF-JCYJ-120)

作者简介:高红芳(1984—),女,汉族,博士,讲师,主要从事纳米复合材料的研究工作。

米材料的生物效应还没有一个统一的认识,对其作用方式也不清楚,各个科研院所对这方面的研究也从未停止过。一些体外研究结果表明,纳米银粒子对皮肤、肝、肺、脑、血管系统以及生殖器官细胞毒性具有一定的诱导作用^[1]。

随着社会的发展,人们生活水平的不断提高,对食品的新鲜度及安全性要求不断提高,纳米银抗菌包装膜在食品保藏方面的优势逐渐凸显,但是其安全性也受到挑战。本文综述了近年来纳米银抗菌包装膜的制备方法、抗菌膜在食品保藏方面的应用以及膜中银的迁移特性,以期为纳米银抗菌包装膜在食品保藏中的应用提供一定的理论基础和技术参考。

1 纳米银抗菌膜的制备方法

纳米银抗菌包装膜是将纳米银粒子添加至天然或人工合成的高分子聚合物基质中制备的一种复合膜材料。常用的成膜基质有聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等不可降解高分子材料,聚乙烯醇、聚乳酸等人工合成的可降解高分子化合物以及淀粉、多糖、果胶等天然高分子化合物。根据纳米银向膜中的添加方式,纳米银抗菌膜的制备方法可分为共混法和原位还原法。不同的制备方法对纳米银粒子复合膜的力学性能、光学性能、水蒸气阻隔性能、膜的抗菌性以及纳米粒子在膜中的分散性产生不同的影响。

1.1 共混法制备抗菌膜

共混法是将纳米银粒子直接添加至成膜基质中制备抗菌膜,是一种较为简单的制备纳米银复合膜的方法,但制备过程中纳米银粒子极易团聚,导致纳米银粒子失去应有的物性和功能。薄艳娜等^[2]将粒径为 20 nm 的银粉添加至聚乙烯中制备抗菌膜,通过扫描电镜观察到纳米银在膜中分布不均匀,出现团聚现象,这种团聚现象使得膜的水蒸气透过率变大。

由于共混法制备抗菌膜过程中纳米银粒子极易团聚,常常需要对纳米银粒子进行一定的修饰来增强其在膜中的分散性。彭中川等^[3]用巯基封端的低相对分子质量聚乙烯改性纳米银颗粒,减小了复合材料中纳米银颗粒与成膜基质的界面能,可使纳米银颗粒均匀地分散在聚合物基体中。王翠英等^[4]制备了以二氧化硅为载体的纳米银粒子,将其添加至塑料中,扫描电镜观察到纳米粒子在塑料中分散均匀。该研究指出,纳米银粒子添加至成膜基质中时,银粒子荷载于其他无机粒子上,无机粒子对银粒子具有一定的吸附

作用,可防止银粒子的聚集。同时,银粒子能与其他具有抗菌性的无机粒子之间产生协同抗菌作用,增强膜的抗菌性。

1.2 原位还原法制备抗菌膜

1.2.1 化学原位还原法

化学原位还原法一般是以高分子成膜基质为分散剂,通过化学还原剂水合肼、硼氢化钠、柠檬酸钠、葡萄糖、抗坏血酸等将前驱体硝酸银中的银离子还原为纳米银。在成膜基质中原位还原制备纳米银溶胶,利用该溶胶制备抗菌膜,可使纳米银粒子均匀地分散在膜材料中。孔杰^[5]采用抗坏血酸原位还原法在壳聚糖水凝胶中制备了粒径为 30 nm 的纳米银溶胶。高向华等^[6]以葡萄糖为还原剂,以淀粉为分散剂,制备了粒径为 20 nm 左右的纳米银-淀粉溶胶。李贵安等^[7]以硼氢化钠作为还原剂在明胶溶液中还原纳米银粒子,从而制备了纳米银-明胶抗菌膜。化学原位还原法制备纳米银抗菌膜的优势在于能在较短的时间内产生大量的纳米银粒子,并可对银粒子的尺寸分布进行较好的控制。但是,该方法中大多数还原剂是有毒有害的,使用该方法制备的抗菌膜用于食品保藏时可能会存在一定的安全隐患。

1.2.2 植物提取液原位还原法

近年来,采用植物提取液作为纳米银粒子的还原剂,在成膜基质中原位还原制备纳米银粒子,从而制备纳米银抗菌膜的研究报道较多。植物提取液含有酚类以及醛类化合物,这些物质都具有一定的还原性,可将银离子还原为纳米银。植物提取液不仅可作为还原剂,提取液中的一些化学基团可与纳米银之间发生络合作用。这种作用不仅起到了稳定纳米银粒子的作用,而且阻止了成膜过程中纳米银的团聚,使纳米银粒子在膜中呈现均匀分布的状态。Orsuwan 等^[8]用香蕉粉作为稳定剂和还原剂制备香蕉粉纳米粒子复合膜,当银含量为 1.0 mmol/L 时,膜具有最高的抗张强度和最低的水蒸气透过系数,并且表现出较强的抗菌性。Kumar 等^[9]使用积雪草提取物还原纳米银粒子并制备纳米银复合膜,扫描电子显微镜观察到纳米粒子在膜中分布均匀。Bhoir 等^[10]以聚乙烯醇水溶液作为模板,使用薄荷提取物还原纳米银粒子,从而制备壳聚糖-明胶复合膜,纳米银的添加提高了膜的机械性能以及水蒸气透过率,而对氧气透过率无显著的影响。Roy 等^[11]以黑色素作为还原剂,在卡拉胶水溶液中原位还原纳米银溶胶制备抗菌膜,纳米银粒子提高了膜的力学性能,该膜对大肠杆菌和李斯特菌表现出较强的抗菌作用。

1.2.3 光介导原位还原法

紫外光的照射使溶液产生水化电子和还原性的自由基,水化电子和自由基可将溶液中的银离子还原为银,制备过程不需要引入其他还原剂。魏涛等^[13]通过紫外光辐照法制备了聚乳酸-纳米银复合膜,在该反应体系中,有机溶剂自身在紫外光作用下产生自由基,可使银离子还原为纳米银。同时,由于有机物分子链的阻碍作用,纳米银粒子在有机网络中难以运动,不易形成更大的粒子,从而有效地控制了纳米银粒子的聚集,提高了膜的热稳定性。Yu等^[14]在纤维素纳米纤丝中利用紫外光合成纳米银粒子,从而制备抗菌膜,该膜对大肠杆菌以及金黄色葡萄球菌具有很好的抗菌效果。该研究推测了纳米银的两种合成机理:一是纤维素吸收紫外线,紫外线会引起纤维素活性位点的断裂(葡萄糖环之间的氧键)形成醛基,醛基将银离子还原为银;二是当水分子暴露在紫外灯下会产生溶剂化电子,这些电子会将银离子还原为银。

2 膜材料中银的迁移特性

2.1 银向食品模拟液中的迁移

毒理学试验研究表明,纳米银粒子一旦进入人体,便会在人体内循环,它们很可能与血浆蛋白、凝血因子、血小板、红细胞及白细胞相互作用,渗透到血细胞中并刺激溶血,影响细胞活力,还可能引起细胞膜增殖和血栓堵塞问题^[15]。因此,纳米银用于食品保藏时其安全性受到质疑。目前,纳米银抗菌膜材料在食品保藏中的安全性研究大多停留在银向食品模拟液及真实食品的迁移的研究。

通常借助食品模拟液代替真实食品来研究抗菌膜中银的迁移特性。研究表明,银的迁移与聚合物基质种类有关,这是由于不同聚合物基质制备的膜密度、黏度、溶解度、机械阻力、溶胀性以及银粒子在膜中的分散性不同。Mackevica等^[16]的研究结果表明,高密度聚乙烯膜中银向食品模拟液的迁移率较高,而聚乙烯膜中银的迁移率相对较低,这与膜本身的性质有关。纳米银的迁移会受到温度的影响,在较低温度条件下,银的迁移相对较慢,而高温则有利于银的迁移。Song等^[17]使用电感耦合等离子体发射光谱测定了在不同温度下聚乙烯醇膜中银向3%乙酸的迁移情况,结果表明,在20、40、70℃的条件下,银的迁移率分别为1.70%、3.00%、5.60%。

银的迁移与模拟液的性质有关。Artiaga等^[18]的研究结果表明,银在3%乙酸和水中的迁移率分别为15 μg/kg和10 μg/kg,可见银在乙酸溶液中的迁移率

相对较高。这是由于银释放的本质是银表面被氧化而释放可溶性银离子,而乙酸可以诱导这种氧化作用^[19]。膜中的添加剂也会对银向食品模拟液中的迁移行为产生影响。田海娇等^[20]研究了纳米银-聚乙烯复合包装膜中两种抗氧化剂与两种光稳定剂对银在乙酸溶液以及乙醇溶液中的迁移特性的影响。结果表明,迁移试验的前8h内,膜中的添加剂会促进银向两种食品模拟液的迁移,待迁移达到平衡后,膜中的添加剂反而阻碍银向这两种模拟液中的迁移。这可能是由于银镶嵌或粘合在添加剂大分子中间从而被阻碍进入溶液中,使银的迁移量减少。

植物提取液作为还原剂制备纳米银抗菌膜,纳米银与植物还原剂中一些成分的官能团之间存在着键合作用,这种作用对银的迁移也会产生一定的影响。Marrez等^[21]使用五倍子提取液及莲子心提取物制备的纳米银-醋酸纤维素抗菌膜在蒸馏水中浸泡72h后,并未检测到银,而用芦丁及槲皮素提取物制备的纳米银-醋酸纤维素中银在蒸馏水中的迁移率分别为0.05 mg/L与0.027 mg/L。

2.2 银向食品中的迁移

由于食品体系的复杂性,银向食品模拟液中的迁移特性并不能完全等同于向食品中的迁移。因此,抗菌膜用于食品保藏时,评价银向真实食品中的迁移显得尤为重要。Li等^[22]利用等离子发射光谱技术测定了在37℃、70%湿度下储藏35d的大米中银的含量,研究表明,大米中的银平均每周增加0.0007 mg/kg(最初大米中银的含量为0.003 mg/kg),存储结束后,大米中银的含量远低于欧洲食品安全局(EFSA)规定的银向食品中的最大迁移量(0.05 mgAg⁺/kg)^[23]。Galocchio等^[24]用从市场上购买的纳米银粒子包装袋储藏鸡肉,并在不同的温度(-18℃、5℃、12℃)下储藏7d,在鸡肉丸中未检测到银。Becaro等^[25]研究了载银二氧化钛-低密度聚乙烯膜中银向鲜切胡萝卜的迁移。研究结果显示,在胡萝卜中未检测到银,表明该包装用于鲜切胡萝卜的贮藏是安全的。

以上研究通过测定食品储藏期间银向食品中的迁移量来评价纳米银应用于食品保藏的安全性。然而,包装材料中银向食品表面或者内部迁移时,银粒子表面可能被修饰,由于聚集、类聚等原因可能引起食品中银的形态和大小发生变化,而纳米银的毒性与这些因素都有关^[26]。因此,为了更加准确地评估包装膜材料在食品保藏中的安全性,不仅应该研究银向食品及食品模拟液中的迁移量,还应对银在食品中的存在形态以及粒径大小进行研究。

3 纳米银抗菌膜在食品保藏中的应用

3.1 纳米银抗菌膜在肉制品保藏中的应用

纳米银抗菌包装膜具有阻隔外部细菌和空气的作用,能抑制肉制品中微生物的生长,延长肉制品的保藏时间。Mathew 等^[27]制备了聚醋酸乙烯-纳米银抗菌膜,该膜通过抑制鸡肉肠中微生物的生长,延长了鸡肉香肠的保藏时间。Azlin-Hasim 等^[28]通过共混方式制备了聚氯乙烯抗菌膜,并将该膜应用于鸡胸肉片的保藏,降低了肉中脂肪氧化程度,延长了肉片的保藏时间。杨斌等^[29]使用含有纳米银的酯化淀粉膜包裹牛肉,再装入聚乙烯包装袋中抽真空包装,并在 4℃下储藏,可使鲜牛肉的储藏期延长至 24 d,较对照组(不进行任何处理直接装入聚乙烯袋抽真空在 4℃下储藏)延长了 9 d。罗晨等^[30]制备了含有纳米银粒子的低密度聚乙烯膜,该膜具有较强的抑菌性和抗脂质氧化能力,将该膜用于虾仁的储藏,可使虾仁货架期延长 2 d。

3.2 纳米银抗菌膜在果蔬贮藏中的应用

纳米银抗菌膜在果蔬贮藏方面表现出一定的优势。这是由于纳米银对乙烯氧化起到一定的催化作用,可加快乙烯的氧化速度,使膜材料具有更好的保鲜效果。同时纳米银抗菌膜也有控制水分和氧气、保留果蔬风味的作用。Singh 等^[31]研究表明,纳米银抗菌包装膜保持了西红柿、白菜中的水分,延长了贮藏时间。Mohammed Fayaz 等^[32]将纳米银-海藻酸钠膜用于胡萝卜和梨的贮藏,取得了很好的效果。Peyro 等^[33]用含有 5 wt% 纳米银的聚乙烯膜包装鲜枣,在 4℃贮藏 53 d 后,鲜枣仍然保持较好的感官品质及可食用性。Fang 等^[34]制备了纳米银-纳米二氧化硅-纳米二氧化钛复合抗菌膜,该膜具有调节氧气和二氧化碳、消除乙烯、抑制微生物生长的作用,延长了蘑菇的贮藏时间。尹敏等^[35]制备了载银二氧化钛-聚乳酸抗菌膜,该膜可抑制双孢蘑菇中微生物的生长与呼吸速率,降低还原糖以及 VC 含量的损失,使双孢蘑菇在 4℃下贮藏 16 d 后仍然保持较好的品质。

3.3 纳米银抗菌膜在其他食品保藏中的应用

纳米银抗菌膜可用于坚果类食品的保藏,一方面,纳米银具有抗菌性,可抑制坚果中霉菌的生长;另一方面,纳米银粒子的添加使膜具有很好的阻隔性,阻止了氧气、二氧化碳以及水分进入包装内,从而延长坚果类食品的保藏时间。Tavakoli 等^[36]使用纳米银-聚乙烯膜对坚果进行储藏试验,研究结果表明,该膜降低了坚果中的霉菌数量,在坚果存储期间没有检测

到黄曲霉毒素,可使开心果、杏仁、榛子和核桃四种坚果的储藏时间分别延长至 20、19、18、18 个月,而无纳米银的对照组仅使坚果最长保存 13 个月。纳米银抗菌膜在其他食品保藏中也显示出其优越性。Ortega 等^[37]制备了含有纳米银粒子的淀粉抗菌膜,银离子抑制了奶酪中微生物的生长,保持了产品原有的感官品质,可使奶酪的保质期延长至 21 d。Emamifar 等^[38]将含有纳米银的低密度聚乙烯膜用于鲜橙汁的保藏时,使鲜橙汁的保质期延长至 28 d。

4 结语

纳米银粒子在食品领域的应用与普及必然会增加人类暴露于纳米材料中的风险。但是,纳米粒子的特殊性使纳米银抗菌膜产生了多种普通包装材料无法比拟的优异特性,这些特性给食品包装行业带来更多机遇。随着食品行业的不断发展,纳米银抗菌包装膜将会在食品储藏保鲜领域得到更广泛的关注。

但是,由于纳米银粒子对人体具有一定的危害性,在纳米银抗菌膜的研究中应尽快建立起合理的安全性评价方法体系,这对纳米银在食品包装领域进一步发展至关重要。同时,纳米银包装膜还存在一些问题有待进一步研究:食品抗菌包装膜中纳米银本身的稳定性、抗菌膜在使用环境中其结构和性质的稳定性、纳米银在与食品接触时其与食品之间的相互作用关系等。这些问题的研究和解决将会促进纳米银在食品保藏方面的进一步应用与发展。

参考文献:

- [1] SAMBHY V, MACBRIDE M M, PETERSON B R, et al. Silver bromide nanoparticle/polymer composites: dual action tunable antimicrobial materials[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128(30): 9798-9808. DOI: 10.1021/ja061442z.
- [2] ASHARANI P V, LOW KAH MUN G, HANDE M P, et al. Cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles in human cells[J]. *ACS Nano*, 2009, 3(2): 279-290. DOI: 10.1021/nm800596w.
- [3] 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. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2017.19.002.
- [4] 彭中川, 李倩, 李化毅. 巯基封端低相对分子质量聚乙烯改性纳米银及其在聚乙烯中的分散性[J]. *石油化工*, 2017, 46(6): 715-719. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2017.06.010.
- [5] 王翠英, 袁铁, 曾钊, 等. 以 SiO₂ 为载体的纳米银粒子的制备及其在塑料中的应用[J]. *塑料工业*, 2006, 34(11): 57-59. DOI: 10.3321/j.issn:1005-5770.2006.11.018.

- [6] 孔杰. 银/壳聚糖纳米复合材料的制备、表征及抗菌性能研究[D]. 广州:暨南大学, 2013.
- [7] 高向华, 王慧芳, 章海霞, 等. 淀粉包覆纳米银粒子的简易合成及其抗菌性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2097-2100. DOI:10.3969/j.issn.1002-185X.2013.10.024.
- [8] 李贵安, 苗润才. 染料包覆纳米银粒子复合膜的制备和表征[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4291.2000.01.013.
- [9] ORSUWAN A, SHANKAR S, WANG L F, et al. One-step preparation of banana powder/silver nanoparticles composite films[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(2): 497-506. DOI:10.1007/s13197-017-2491-1.
- [10] KUMAR S, MITRA A, HALDER D. Centella asiatica leaf mediated synthesis of silver nanocolloid and its application as filler in gelatin based antimicrobial nanocomposite film [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 293-300. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.06.061.
- [11] BHOIR S A, CHAWLA S P. Silver nanoparticles synthesized using mint extract and their application in chitosan/gelatin composite packaging film[J]. International Journal of Nanoscience, 2017, 16(1). DOI: 10.1142/S0219581X16500228.
- [12] ROY S, SHANKAR S, RHIM J W. Melanin-mediated synthesis of silver nanoparticle and its use for the preparation of carrageenan-based antibacterial films[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 237-246. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.013.
- [13] 魏涛, 朱永军, 慈书亭, 等. 紫外光辐照法制备聚乳酸/纳米银复合薄膜[J]. 合成树脂及塑料, 2014, 31(4): 29-32. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1396.2014.04.009.
- [14] YU Z L, WANG W, DHITAL R, et al. et al. Antimicrobial effect and toxicity of cellulose nanofibril/silver nanoparticle nanocomposites prepared by an ultraviolet irradiation method [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2019, 180: 212-220. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2019.04.054.
- [15] CALDERÓN-JIMÉNEZ BRYAN, JOHNSON M E, MONTORO BUSTOS A R, et al. Silver nanoparticles: technological advances, societal impacts, and metrological challenges [J]. Frontiers in Chemistry, 2017, 5: 1-26. DOI: 10.3389/fchem.2017.00006.
- [16] MACKEVICA A, OLSSON M E, HANSEN S F. Silver nanoparticle release from commercially available plastic food containers into food simulants[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2016, 18(1): 1-11. DOI: 10.1007/s11051-015-3313-x.
- [17] SONG H, LI B, LIN Q B, et al. Migration of silver from nanosilver-polyethylene composite packaging into food simulants[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2011, 28(12):1758-1762. DOI: 10.1080/19440049.2011.603705.
- [18] ARTIAGA G, RAMOS K, RAMOS L, et al. Migration and characterisation of nanosilver from food containers by AF-ICP-MS[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 76-85. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.05.139.
- [19] ECHEGOYEN Y, NERÍN C. Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers[J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 62: 16-22. DOI: 10.1016/j.fct.2013.08.014.
- [20] 田海娇, 林勤保, 郭捷, 等. 纳米银-聚乙烯复合包装中助剂对银向食品模拟物迁移的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 8-12. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201405002.
- [21] MARREZ D A, ABDELHAMID A E, DARWESH O M. Eco-friendly cellulose acetate green synthesized silver nano-composite as antibacterial packaging system for food safety[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 20. DOI: 10.1016/j.fpsl.2019.100302.
- [22] LI L, ZHAO C J, ZHANG Y D, et al. Effect of stable anti-microbial nano-silver packaging on inhibiting mildew and in storage of rice[J]. Food Chemistry, 2016, 215: 477-482. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.08.013.
- [23] Commission Regulation (EU). No.10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food[S/OL]. Official Journal of the European Union: 2011. (2011-01-14)[2020-01-02].<http://www.doc88.com/p-9955321686508.html>.
- [24] GALLOCCHIO F, CIBIN V, BIANCOTTO G, et al. Testing nano-silver food packaging to evaluate silver migration and food spoilage bacteria on chicken meat[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2016, 33(6): 1063-1071. DOI: 10.1080/19440049.2016.1179794.
- [25] BECARO A A, PUTI F C, PANOSSO A R, et al. Postharvest quality of fresh-cut carrots packaged in plastic films containing silver nanoparticles[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(4): 637-649. DOI: 10.1007/s11947-015-1656-z.
- [26] METAK A M, NABHANI F, CONNOLLY S N. Migration of engineered nanoparticles from packaging into food products [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 781-787. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.06.001.
- [27] MATHEW S, SNIGDHA S, MATHEW J, et al. Biodegradable and active nanocomposite pouches reinforced with silver nanoparticles for improved packaging of chicken sausages [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 19: 155-166. DOI: 10.1016/j.fpsl.2018.12.009.
- [28] AZLIN-HASIM S, CRUZ-ROMERO M C, MORRIS M A, et al. The Potential application of antimicrobial silver poly-vinyl chloride nanocomposite films to extend the shelf-life of chicken breast fillets[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(10): 1661-1673. DOI: 10.1007/s11947-016-1745-7.
- [29] 杨斌, 曹莹娟, 余群力, 等. 纳米银酯化淀粉膜对牛肉保鲜的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 199-205. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20181220-244.

- [30] 罗晨,董铮,庄松娟,等. 纳米银抗菌包装对虾仁冷藏过程中品质的影响[J]. 包装工程, 2018, 373(7):60-64. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.07.012.
- [31] SINGH M, SAHARREN T. Investigation of cellulosic packets impregnated with silver nanoparticles for enhancing shelf-life of vegetables[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 116-122. DOI: 10.1016/j.lwt.2017.07.056.
- [32] MOHAMMED FAYAZ A, BALAJI K, GIRILAL M, et al. Mycobased synthesis of silver nanoparticles and Their incorporation into sodium alginate films for vegetable and fruit preservation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(14): 6246-6252. DOI: 10.1021/jf900337h.
- [33] PEYRO M F, HASHEMI P H, HEIDARI N A, et al. Investigation into shelf life of fresh dates and pistachios in a package modified with nano-silver[J]. Global Journal of Health Science, 2016, 8(5):134-139. DOI: 10.5539/gjhs.v8n5p134.
- [34] FANG D L, YANG W J, KIMATU B M, et al. Effect of nanocomposite-based packaging on storage stability of mushrooms(*Flammulina velutipes*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 489-497. DOI: 10.1016/j.ifset.2015.11.016.
- [35] 尹敏, 楚状状, 覃宇悦, 等. 聚乳酸纳米复合包装对双孢蘑菇保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(17): 260-263. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.17.050.
- [36] TAVAKOLI H, RASTEGAR H, TAHERIAN M, et al. The effect of nano-silver packaging in increasing the shelf life of nuts: An *in vitro* model[J]. Italian Journal of Food Safety, 2017, 6(4): 156-161. DOI: 10.4081/ijfs.2017.6874.
- [37] ORTEGA F, GIANNUZZI L, ARCE V B, et al. Active composite starch films containing green synthesized silver nanoparticles[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 152-162. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2017.03.036.
- [38] EMAMIFAR A, KADIVAR M, SHAHEDI M, et al. Evaluation of nanocomposite packaging containing Ag and ZnO on shelf life of fresh orange juice[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(4): 742-748. DOI: 10.1016/j.ifset.2010.06.003.

收稿日期:2020-02-20