

王荣灿, 王馨翊, 曲正义, 等. 纳米材料在人参、蔬菜和水果保鲜中的应用 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 436–443. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080043

WANG Rongcan, WANG Xinyi, QU Zhengyi, et al. Application of Nanomaterials in Preservation of Ginseng, Vegetable and Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 436–443. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080043

· 专题综述 ·

纳米材料在人参、蔬菜和水果保鲜中的应用

王荣灿¹, 王馨翊¹, 曲正义^{1,2}, 金 琨³, 李亚丽^{1,2,*}

(1. 中国农业科学院特产研究所, 吉林长春 130112;

2. 吉林省中药材种植(养殖)重点实验室, 吉林长春 130112;

3. 空军航空大学航空基础学院, 吉林长春 130041)

摘 要:近年来纳米材料发展迅速, 由于其具有易加工、韧性强、能吸附和抑菌活性强等优良特性, 在果蔬等食品保鲜方面应用广泛。本文从纳米材料的制备及特性, 人参、蔬菜和水果等食品的纳米涂膜复合保鲜和纳米包装材料保鲜等方面进行综述, 通过与普通保鲜材料对比发现了纳米涂膜保鲜材料和纳米包装保鲜材料的强抑菌活性、高抗氧化活性、高 V_C 和叶绿素保持率、低失重率、绿色环保、易降解和抑制木质化劣变现象等优势。纳米保鲜材料主要通过形成高 CO_2 高湿和低 O_2 的环境, 减弱呼吸作用, 降低食品腐烂率, 延长食品货架期。此外纳米保鲜材料还存在纳米迁移和细胞毒性等问题, 未来要加强对纳米材料的安全性能评价, 期望本文为纳米材料在人参等食品保鲜中的应用提供科技支撑。

关键词: 纳米材料, 食品保鲜, 人参, 蔬菜, 水果

中图分类号: TS205.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)10-0436-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080043



本文网刊:

Application of Nanomaterials in Preservation of Ginseng, Vegetable and Fruit

WANG Rongcan¹, WANG Xinyi¹, QU Zhengyi^{1,2}, JIN Kun³, LI Yali^{1,2,*}

(1. Institute of Special Animal and Plant Sciences of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130112, China;

2. Jilin Provincial Key Laboratory of Traditional Chinese Medicinal Materials Cultivation and Propagation, Changchun 130112, China;

3. Basic Aviation College, Air Force Aviation University, Changchun 130041, China)

Abstract: Nanomaterials have developed rapidly in recent years and have been widely used in the preservation of foods such as fruit and vegetable because of their easy processing, toughness, ability to adsorb and strong antibacterial activity. This paper reviews the preparation and characteristics of nano materials, the preservation of ginseng, vegetable and fruit by nano-coating and nano-packaging materials. By comparing with ordinary preservation materials, the strong antibacterial activity, high antioxidant activity, high vitamin C and chlorophyll retention, low weight loss rate, green environment, easy degradation and inhibition of lignification deterioration of nano-coated film preservation materials and nano-packaging preservation materials are highlighted. The advantages of nano-packaging preservation materials can reduce the rate of food spoilage and prolong the shelf life of food by forming an environment with high CO_2 , high humidity and low O_2 , which weakens respiration. In addition, nano-preservation materials have problems such as nano-migration and cytotoxicity, and the evaluation of the safety performance of nanomaterials should be strengthened in the future. This paper provides scientific and technological support for the application of nanomaterials in the preservation of ginseng and other food.

Key words: nano material; food preservation; ginseng; vegetable; fruit

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 吉林省发改委产业技术研究与开发专项(2021C040-2); 吉林省科技厅重点专项(20210204178YY)。

作者简介: 王荣灿(1997-), 女, 硕士, 研究方向: 食药分析及质量评价, E-mail: can1939958416@163.com。

* 通信作者: 李亚丽(1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食药分析及质量评价, E-mail: Yalilee@126.com。

随着绿色、环保、健康意识的不断深入,人们对于食品的品质和储藏效果提出了更高的要求^[1],进而推动了保鲜方法的发展和更新。气调保鲜、低温贮藏、辐照保鲜和覆膜保鲜等是最常用的食品保鲜方法^[2-4],但现有的保鲜工艺和保鲜技术大多较为复杂,成本较高,且保鲜效果不太理想,因此亟需发展新的高效食品保鲜方法。

人参作为新资源食品,在膳食保健和食品开发等领域应用广泛。研究表明人参具有免疫调节、抗肿瘤、抗辐射及降血糖等生物活性^[5-7],鲜参的生物活性更强^[8],食用和加工更方便,所以鲜参的需求量逐渐增大。目前鲜参主要分为新鲜人参和保鲜人参两种,但新鲜人参的供应存在着较强的季节性、区域性及本身的易腐性,所以鲜参主要是保鲜人参。果蔬由于含水量较高,采收后呼吸和蒸腾作用并不会停止,仍然会消耗内部的营养物质,导致失水和腐烂等现象^[9],严重影响食品品质,造成食品资源的大量浪费,因此亟需发展更绿色高效的食品保鲜方法。

纳米材料作为一种前沿性和交叉性的新兴材料日渐成为研究的热门领域,其与普通材料相比,具有耐热、抑菌、抗氧化和拉伸强度高等优势^[10-11]。纳米材料的几何尺寸位于 1~100 nm,是处于亚稳态的物质,并且比表面积大,粒径小,表面原子比例高,具有独特的电子运动状态和表面效应,表现出宏观量子隧道效应和量子尺寸效应,这些结构上的特点使其具有极强的吸附性、韧性、抑菌活性和防腐保鲜等功能^[12-13]。因此不仅可以将其制成纳米涂膜复合保鲜材料直接作用于需要保鲜的食品,还能制成纳米包装材料,增强包装材料的保鲜效果,进而对食品进行保鲜,两种纳米保鲜方法的合成及应用步骤详见图 1。将纳米材料应用于食品保鲜能更好地维持食品品质、延长货架期,从而提高保鲜效果,减少经济损失。本文综述了纳米保鲜材料在人参、蔬菜和水果等植物食品保鲜方面的应用,从纳米涂膜复合保鲜材料和纳米保鲜包装材料两个方面分别综述了纳米材料在各个领域的保鲜效果,充分展现了纳米材料的保鲜优势,期望为纳米材料在食品保鲜中的进一步应用提供科学依据。

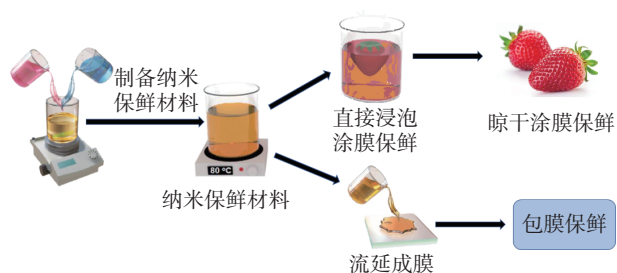


图 1 两种纳米保鲜材料的合成及应用图

Fig.1 Synthesis and application of two nano-preservation methods

1 纳米保鲜材料制备方法及特性

纳米材料应用于食品保鲜主要有涂膜保鲜和包

装材料保鲜两种方式,纳米包装材料主要包括纳米分子筛保鲜薄膜、纳米银保鲜薄膜和纳米 TiO_2 保鲜薄膜等,纳米银和纳米 TiO_2 等是最常用的纳米涂膜复合保鲜材料。纳米保鲜包装材料与普通包装材料的对比见表 1,对比发现纳米包装材料保鲜效果更好,更绿色环保,是符合可持续发展的更优质新型保鲜材料。

表 1 普通包装材料与纳米包装材料优缺点的对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of ordinary packaging materials and nano-packaging materials

包装材料	常用类型	缺点	优点	参考文献
普通材料	PE、低密度聚乙烯、聚丙烯、聚丙稀和聚酰胺等	透气性差,厚度大、机械性能差,无抑菌作用、难降解、不环保	携带方便,透明度高,热封性能好	[10,13]
纳米材料	纳米分子筛保鲜薄膜、纳米银保鲜薄膜和纳米 TiO_2 保鲜薄膜等	透明性低、热封性能差	抗菌、低透氧率、耐热耐侵蚀性强、可阻隔二氧化碳、抗氧化和拉伸强度高,绿色环保、易降解	[11-12,14]

纳米保鲜材料具有很强的抑菌效果,可显著提高人参等食品的保鲜效果并延长货架寿命,应用前景广阔^[14-16]。将纳米粒子(nanoparticles, NPs)加入保鲜材料能够改善其阻隔性能、机械强度、热性能和功能性能,常用的制备纳米复合保鲜材料的制备方法有原位聚合法、溶胶-凝胶法、熔融制备法和溶液共混法等^[17]。由于纳米粒子与其他基质接触时倾向于形成团聚物,纳米颗粒容易堆叠和不完全剥落^[18],所以制备纳米复合保鲜材料时要将纳米填料均匀分散。

Choi 等^[19]通过熔融制备法将聚丙烯、有机粘土和马来化聚丙烯制成聚丙烯/粘土纳米复合材料,研究表明与聚丙烯相比,纳米复合材料具有更优的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度,并且随着粘土浓度的增加,熔化和降解温度也逐渐上升。Duan 等^[20]为了提高纳米复合薄膜的性能,扩大抗真菌活性,将不同质量浓度的 TiO_2 NPs 通过溶液共混法加入到魔芋葡甘露聚糖(konjac glucomannan, KGM)和 k-角叉菜胶(k-carrageenan, KC)中,制成 KC/KGM/ TiO_2 纳米保鲜材料,研究表明 TiO_2 NPs 的添加增强了其热稳定性、紫外线阻隔性能、力学性能、水蒸气渗透性和疏水性。Balasubramanian 等^[21]用同样的方法制得了高弹性、高抑菌活性和可拉伸的紫外线防护纳米复合薄膜。陈方飞等^[22]通过研究原位聚合法制备纳米改性聚合物发现该法中纳米粒子的相容性和分散性较好,合成纳米材料的机械性能均有所提高。Sun 等^[23]制备了来自木材、甘蔗和蟹壳的可持续纳米材料(Sustainable nanomaterials, SNM),比较了它们对草莓的保鲜效果,涂层纳米材料在一定程度上抑制了重量损失,还能保护水果免受紫外线损伤,所有 SNM 涂层均表现出良好的抗真菌活性,有助于保持

水果的新鲜度。研究表明,木材纳米晶和壳聚糖纳米纤维共混物在抗真菌活性和变色延迟方面表现出最佳性能,该研究为开发水果包衣系统以延长其保质期开辟了新的方法和思路。几种纳米复合保鲜材料的制备方法对比如表2所示,由表可知 NPs 的加入均能够改善保鲜材料的性能及保鲜效果,但实际制备时应根据原料特性选择最优的制备方法。

表2 四种纳米复合保鲜材料制备方法优缺点的对比
Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of the four preparation methods of nano-composite preservation materials

制备方法	优点	缺点	参考文献
熔融 制备法	拉伸强度、弯曲强度和冲击强度高,相容性较好	操作繁琐,温度较高,耗能较高	[19]
溶液 共混法	操作简便,均匀性好,热稳定性、机械性和水阻隔性、弹性、抑菌活性高和可拉伸的紫外线防护效果	薄膜透明度较差,薄膜结构完整性降低	[20-21]
原位 聚合法	操作简便,均匀性好,纳米粒子的相容性和分散性较好,合成纳米材料的机械性能好	光、仿生与智能方面的研究还不够深入,未实现大规模工业化生产	[22]
溶胶- 凝胶法	相容性较好,抗真菌活性和紫外防护效果好	操作繁琐	[23]

2 纳米材料在人参保鲜方面的应用

人参作为珍贵的药食两用植物,备受关注。鲜参易于加工、食用和吸收,还能够最大限度地保存人参中的生物活性物质。目前常用的人参保鲜方法有辐照保鲜、沙藏保鲜和生物保鲜剂贮藏等^[24-25],贾璐璐等^[26]研究低温下采收地土壤、蛭石和珍珠岩等对鲜参的保鲜效果,研究发现珍珠岩 4℃ 保鲜 6 个月时保鲜参外观仍旧较好且栽种能够成活,并且保鲜参中 SOD 酶和 POD 酶活性较其他保鲜处理组低。Hu 等^[27]研究发现人参在聚氯乙烯膜 0℃ 限气保鲜条件下,能够保鲜 210 d。王聪^[28]制备了一种淀粉涂膜保鲜剂,其最佳辅助剂配方是 1.5% 的海藻酸钠、1.0% 的柠檬酸、0.005% 的肉桂精油,研究表明该涂膜保鲜方法在 4℃ 保鲜时能够减少阶段失重率和总人参皂苷含量。Gao 等^[29]通过用⁶⁰Co-γ 或 2 和 4 kGy 剂量电子束辐照鲜人参,从而实现人参保鲜的目的,研究发现较低的辐照剂量和低温的组合是延长新鲜

人参货架期的最佳条件,并且不会损害其成分,其中保鲜 120 d 时 2 kGy 电子束辐照鲜参的腐烂率最低,人参总皂苷和氨基酸含量最高。这是目前研究常用的人参保鲜方法,保鲜效果基本满足现在的需求,但是随着绿色和可持续发展的深入,绿色、高效无害的、新的保鲜方法也在不断开发,纳米材料保鲜就是一个新的研究方向,它不仅保鲜效果好,还能减轻环境危害。Kang 等^[30]研究壳聚糖-ZnO NPs 食用涂层对高丽参(wild-simulated Korean ginseng, WsKG)的保鲜作用,研究表明 0.03% 的 ZnO NPs 被认为具有最佳的抗菌效果,并且 6 周时微生物浓度低于限值。ZnO NPs 能穿透细菌的细胞,从而破坏蛋白质、DNA 和脂质,破坏细胞膜或引起细胞裂解,产生应激自由基,5℃ 保鲜时,涂膜的 WsKG 质量优于对照。虽然目前关于纳米材料在人参保鲜方面的应用研究较少,但是随着绿色可持续性发展的要求以及其在保鲜方面研究的不断深入,纳米材料逐渐能够广泛应用到人参等药食同源药材的保鲜中,延长鲜用药材的保鲜时间,并且该方法保鲜人参不仅可以维持鲜参中活性成分的含量,降低活性成分降解程度,还能够维持人参外观、色泽和浆气,增加其经济价值。不同人参保鲜方法的贮藏条件、保鲜时间、保鲜效果和保鲜材料的组成对比见表3。

3 纳米材料在蔬菜保鲜上的应用

3.1 纳米涂膜复合保鲜材料在蔬菜保鲜上的应用

蔬菜在贮藏和运输过程中经常会出现变质甚至是腐烂,严重影响蔬菜的经济价值,因此蔬菜保鲜格外重要^[31]。陈韵洁等^[32]通过正交试验得出纳米保鲜涂膜液的最佳质量浓度,壳聚糖、纳米蒙脱石粉和乳清分离蛋白分别为 20、12 和 60 g/L。研究表明“心香”甘薯的贮藏保鲜能降低甘薯的失重率和淀粉含量损失,减弱甘薯的代谢作用。纳米复合涂膜能够抑制微生物的生长,是因为具有独特多层结构的蒙脱石可以改善原有的水蒸气屏障,使扩散途径更加曲折,进而降低水蒸气透过率,Maria 等^[33]利用乳酸菌聚合物/蒙脱石纳米颗粒复合涂膜保鲜草莓也得到了相似的结论。研究发现浓度较低的壳聚糖膜力学性能较差,易断裂,会使部分甘薯表面裸露,削弱保鲜效果,引入蒙脱石后,壳聚糖膜的抗菌和抗氧化性得到了改善,

表3 不同人参保鲜方法对比

Table 3 Comparison of different methods of ginseng preservation

保鲜方法	保鲜材料的组成	保鲜温度	保鲜时间	保鲜效果	参考文献
沙藏保鲜	土壤、蛭石和珍珠岩	4℃	6个月	珍珠岩保鲜人参中皂苷、蛋白含量较高,参体外观品相完好,具有成活能力;SOD酶和POD酶活性较低	[26]
气调保鲜	聚氯乙烯膜	0℃	210 d	抑制呼吸速率,降低质量损失率和腐烂率,总皂苷、还原糖和果胶含量较高	[27]
涂膜保鲜	海藻酸钠、柠檬酸、肉桂精油等	4℃ 25℃	150 d	4℃保鲜人参失重率较低,总皂苷含量较25℃高	[28]
辐照保鲜	⁶⁰ Co-γ或2和4 kGy电子束	2℃	120 d	2 kGy电子束失重率较低,人参总皂苷和氨基酸含量最高	[29]
纳米涂层保鲜	壳聚糖和纳米ZnO	5℃	/	抑菌效果好,未包衣的4周出现霉菌,包衣的6周内未出现,6周时微生物浓度低于微生物限值	[30]

表 4 蔬菜纳米保鲜包装材料的保鲜效果对比

纳米保鲜包装材料组成	保鲜蔬菜种类	保鲜条件	保鲜时间	保鲜效果	参考文献
纳米银、纳米TiO ₂ 、高岭土和PE	生菜	温度: 4 ℃	14 d	质量损失率、丙二醛含量、多酚氧化酶比活力低于普通包装, V _C 和叶绿素含量高于对照组	[36]
纳米银、纳米TiO ₂ 、纳米凹凸棒土、纳米SiO ₂ 和PE	双孢菇	温度: 4±0.5 ℃ 相对湿度: 90%±5%	10 d	较好地保持双孢菇的质地, 抑制子实体的自溶、木质化劣变的现象, 延长贮藏时间	[37]
纳米TiO ₂ 和聚乳酸膜	油菜	温度: 23 ℃	8 d	抑菌性强, 呼吸速率和腐烂率低于聚乳酸膜对照组	[38]
魔芋葡甘聚糖/角叉菜胶纳米SiO ₂	双孢菇	温度: 4±1 ℃	12 d	减少了水分和气体的转移, 降低了双孢菇的呼吸, 延缓衰老和质量恶化	[40]

并增强了膜的强度, 这与 Afonso 等^[34]的研究结论一致。由此可见, 纳米涂膜保鲜材料能够改善抑菌和抗氧化性能, 增强保鲜效果。

3.2 纳米保鲜包装材料在蔬菜保鲜上的应用

传统包装材料存在难降解、污染重和毒害大等缺点^[35], 新型纳米包装材料抑菌和保鲜效果好, 大多可降解更加绿色环保。近年来有很多关于蔬菜的纳米保鲜包装材料的研究, 马宁等^[36]将一种含纳米银、纳米 TiO₂ 和高岭土的食品用纳米包装材料应用到生菜保鲜中, 研究表明保鲜 14 d 时, 纳米包装材料保鲜的生菜质量损失率显著低于普通包装材料($P<0.01$), 且在贮藏前期能显著地保持叶绿素含量($P<0.05$), V_C 含量下降从前期急剧降低到后期逐渐平缓, 其对 V_C 的保藏效果优于普通包装材料, 且能减缓酶促褐变。李志啸等^[37]将纳米银、纳米 TiO₂、纳米凹凸棒土和纳米 SiO₂ 等加入到包装材料里制得一种纳米聚乙烯膜(Poly ethylene, PE), 在(4±0.5) ℃、相对湿度 90%±5% 贮藏条件下, 研究表明纳米包装材料能够通过延缓硬度下降来保持双菇菌的质地, 与普通 PE 材料相比, 纳米包装材料的透氧率和透湿率更低, 使包装袋中能够形成低氧和高湿的环境, 从而降低了双孢菇呼吸强度和褐变程度, 延缓了双孢菇细胞壁中木质素、纤维素和几丁质含量的增加及双孢菇的老化, 降低了细胞壁的代谢速率。Xing 等^[38]研究加入抗菌剂纳米 TiO₂ 的聚乳酸膜对油菜的保鲜效果, 结果表明 4% TiO₂ 聚乳酸抗菌膜对金黄色葡萄球菌的抑菌率为 91.3%, 对大肠杆菌的抑菌率为 90.8%, 能显著延长油菜的贮藏保质期。马清华等^[39]研究不同质量分数 SiO₂/TiO₂ NPs 的聚乙烯醇(Poly-vinyl alcohol, PVA)基纳米复合膜对双孢菇的保鲜效果, 研究表明 1% TiO₂ 纳米复合膜比其他纳米复合膜处理的双孢菇的白度高, 能够达到 86.18, 能更好地抑制呼吸作用和减少水分蒸发, 并且有良好的抗菌作用。

Zhang 等^[40]研制的魔芋葡甘聚糖/角叉菜胶纳米 SiO₂ 包装膜, 将新鲜双孢菇的保质期从 5 d 延长至 12 d, 保持其白度、视觉外观和硬度, 还能够控制采后的新陈代谢和衰老, 降低了双孢菇的呼吸速率, 从而延长其保质期并保持其质量, 有效延长了双孢菇的货架期, Duan^[20]和 Yan 等^[41]也证明了纳米包装

膜的抑菌作用和保鲜效果。综上所述, 纳米保鲜包装材料与普通包装材料比透氧率和透湿率更低, 抑菌率更高, 保鲜效果更佳, 不同纳米保鲜包装材料的保鲜效果对比见表 4。

4 纳米材料在水果保鲜中的应用

4.1 纳米涂膜复合保鲜材料在水果保鲜上的应用

水果极易腐烂, 如果采后和运输过程中不能采用合适的保鲜方法保鲜会引起食品变质, 从而造成大量的经济损失, 所以采后水果保鲜非常重要^[42]。水果涂膜保鲜是在水果表面形成一层薄膜, 进而减弱水果的呼吸作用^[43-44]。将纳米材料应用于水果保鲜可以催化加速水果贮藏中产生的乙烯等气体的氧化分解, 降低水果的衰变速度^[45]。

Jung 等^[46]研究生物纳米复合材料对水果的保鲜作用, 选取三种呼吸跃变型水果(香蕉、鳄梨和木瓜)及一种非呼吸跃变型水果(草莓), 购买 8~11 d 后, 未包衣的呼吸跃变型水果在外部均显示酶促褐变和腐烂, 而涂层样品保持外观超过一周, 并且涂层水果内部的成熟度较低。在非呼吸跃变型水果里也证实了涂层能够保持易腐水果的新鲜度, 维持其硬度和可缩性。吕佳美悦^[47]将羧甲基壳聚糖/纳米 SiO₂ 复合膜和羧甲基壳聚糖/纳米 ZnO 复合膜的保鲜效果进行对比, 研究表明它们均能够延长草莓和冬枣的货架期, 后者的效果稍好于前者。纳米涂膜复合保鲜材料在表面能形成限气层, 减弱呼吸作用, 还能减少水分蒸发, 从而减弱衰老和萎蔫进程^[48], 从而延长其货架期。

曾丽平等^[49]研究添加具有抑菌作用的纳米 TiO₂ 的壳聚糖涂膜液联合外源 NO 对枇杷的保鲜效果, 发现 0.05 mmol/L 外源 NO 能减缓采后冷藏枇杷果实的木质化进程, 减少冷害的发生; 保鲜 75 d 时外源 NO 联合纳米 TiO₂ 涂膜保存的枇杷的菌落总数、质量损失率和腐烂率都很低, 还减弱了木质化败坏, 表明其具有良好的枇杷保鲜效果。张蓓等^[50]研究发现蜂胶/纳米 SiO₂ 复合涂膜可延缓圣女果中自由基的产生速率, 保持清除酶的活性, 抑制引起果实褐变及软化的多聚半乳糖醛酸酶、果胶酯酶和纤维素酶的活性^[51-52]。

精油因其强大的抗菌和抗氧化活性而应用于食品保鲜备受关注^[53-54]。Chu 等^[55]开发了一种用于草

表 5 纳米涂膜保鲜在水果保鲜中的研究对比

Table 5 Comparison of studies on the preservation of fruits by nano coating

保鲜材料组成	水果种类	保鲜条件	保鲜时间	涂层作用	参考文献
纤维素纳米晶、甘油、蛋清和蛋白等	香蕉、鳄梨、草莓和木瓜	常温	8~11 d	维持果实硬度、可压缩性和成熟率,降低酶促褐变和腐烂率	[46]
羧甲基壳聚糖、丙三醇、纳米SiO ₂ 和纳米ZnO等	草莓和冬枣	室温	草莓5 d 冬枣10 d	降低失重率,减缓可滴定酸度和V _C 的减少	[47]
壳聚糖、外源NO和纳米SiO ₂	枇杷	4±1 ℃	75 d	降低菌落总数、质量损失率和腐烂率,减弱木质化败坏	[48]
明胶、甘油、蜂胶和纳米SiO ₂	圣女果	4 ℃	18 d	抑制了PPO、多聚半乳糖醛酸酶、果胶酯酶和纤维素酶等酶活性变化	[49]

莓储存的肉桂精油纳米乳液的支链淀粉涂层,纳米乳液基涂料在减少质量损失、硬度、总可溶性固体含量、酸度以及控制水果储存过程中真菌和细菌的生长方面比其他涂料效果更佳。纳米材料涂膜保鲜水果的研究效果对比见表5,综上所述纳米涂膜保鲜材料不仅可以降低水果的失重率和腐烂率,增强抑菌活性,还能够减慢果实的褐变和软化,延长水果的贮藏期和货架期。

4.2 纳米保鲜包装材料在水果保鲜上的应用

将纳米材料加入到原有的保鲜膜中制得新的复合纳米膜,并将它应用于保鲜中,不仅可以改善原有保鲜膜的韧性,还能够增加复合纳米膜的抑菌作用^[56-57]。隋思瑶等^[58]采用热压法制备包含司班-20、吐温-20和纳米TiO₂的PE防雾膜,并将其应用于草莓保鲜。研究表明该PE防雾膜保鲜的草莓的硬度和可溶物含量显著高于其他PE薄膜组,表明该PE防雾包装材料对草莓具有保鲜作用。吴黎明等^[59]通过研究发现采用喷涂纳米保鲜H-Sol溶液的包装纸单果包装的夏橙的好果率和内在品质都优于对照组、包装箱底放置喷涂纳米材料的特制蜂窝纸组和在包装箱隔板和内壁喷涂的纳米材料组,研究表明在贮藏过程中纳米包装材料能够抑制霉菌的生长,起到保鲜效果。综上所述,纳米材料的抑菌作用减少了水果的腐烂率。于子越等^[60]利用纳米银的抑菌作用,将其用于食品储藏,效果显著。

Yang等^[61]为了制得相对湿度较低、透氧率高、纵向强度高的新型保鲜包装材料,将纳米粉体(纳米银、高岭土、锐钛矿TiO₂和金红石TiO₂)加入到PE中制得新型包装材料,并将其用于草莓的保鲜贮藏,4℃保鲜12d后纳米包装材料的总可溶性固形物含量、可滴定酸度和抗坏血酸含量的降低受到显著抑制,保鲜效果显著优于普通PE对照组。罗自生等^[62]研究纳米SiO₂改性的低密度聚乙烯(LDPE)膜对新鲜草莓贮藏期间生理和品质的影响,研究表明保鲜14d后其抗氧化酶活性较高,活性氧自由基积累较少;还能够减缓硬度和可滴定酸含量的下降及腐烂指数的上升,使贮藏后期含有较多的抗坏血酸和总酚。张瑶等^[63]也证明了加入纳米Ag粉和纳米SiO₂均能够延长货架期和保存果实内V_C的含量。

Li等^[64]用纳米TiO₂粉制备一种LDPE包装材料,研究其对草莓果实品质和抗氧化能力的影响。研究表明LDPE与对照组相比能迅速形成高CO₂低O₂的环境,能够显著抑制草莓腐烂,降低失重率,减缓硬度、可滴定酸和抗坏血酸含量的降低,并且LDPE中参与活性氧清除的抗氧化酶的活性在贮藏后期显著高于对照组,保鲜效果更好。综上所述,常用改性保鲜膜的纳米材料纳米银、纳米SiO₂和纳米TiO₂均能够改善包装材料的特性,从而改变包装膜的透湿透氧性,增强其抑菌作用,使其保鲜效果更加佳。

5 结论与展望

食品保鲜效果评价是反映保鲜效果好坏的重要指标,综合以上文献可以得出,常用的食品保鲜效果评价方法分为两类,分别是外观评价和内在品质评价,外观包括硬度、失重率、好果率和腐烂率等,内在品质包括各种生物活性酶、水果蔬菜中的叶绿素含量、可溶性固体含量、可滴定酸和V_C含量,以及人参中的总皂苷、还原糖、蛋白质和氨基酸含量等。通过保鲜前后和对照组比较确定保鲜后食品的活性成分含量,进而确定保鲜效果和保鲜方法的优劣。

纳米保鲜材料能在食品表面形成致密的薄膜,并且该膜具有选择通过性,可以在食品表面形成高CO₂、高湿和低O₂的环境,从而减弱食品的呼吸作用,减少食品的内耗,增强抑菌活性,降低食品腐烂率,延长食品货架期。目前纳米保鲜材料已经越来越多的应用于食品保鲜中,但还存在一些问题,如纳米迁移^[65],它会把纳米材料中的物质运输到保鲜材料中;另外纳米保鲜材料的安全问题也是一个关键问题^[66-67],纳米材料的细胞毒性还有待进一步的深入研究^[68-69],因此需要加强安全性能评估为纳米保鲜材料在食品保鲜方面的应用保驾护航。并且随着纳米材料在果蔬保鲜应用的不断深入,在应用中出现的问題和弊端也可以为其在鲜用药材保鲜方面起到指导作用,将纳米保鲜方法与多种保鲜方法交叉运用,择其优点,最大限度保留鲜用药材的活性成分。

目前纳米保鲜材料还有一些问题亟待解决,相信随着研究的不断深入和安全评价体系的完善,纳米材料保鲜技术将更加成熟。研制更优、更绿色环保的纳米保鲜材料,改善现有保鲜方法的缺点及实际生

产和应用中的不足之处,这些与纳米保鲜材料的研发和应用相关的研究都将是今后的热点。

参考文献

- [1] 顾广东,朱昌保,徐浩,等.纳米材料在食品储藏领域应用的研究进展[J].*粮油食品科技*,2018,26(3):80-86. [GU G D, ZHU B C, XU H, et al. Research progress of application of nanomaterials in food storage[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2018, 26(3): 80-86.]
- [2] QU P, ZHANG M, FAN K, et al. Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 62(1): 11-15.
- [3] 张柯,吕中伟,牛佳佳,等.不同晚熟葡萄品种低温贮藏期果实品质变化研究[J].*中国果树*,2022(4):72-75. [ZHANG K, LV Z W, NIU J J, et al. Study on changes of fruit quality of different late-ripening grape cultivars during low temperature storage[J]. *China Fruits*, 2022(4): 72-75.]
- [4] 徐悦,赵国建,朱永宝,等.冬枣生理变化及保鲜机理研究进展[J].*特产研究*,2020,42(6):90-95. [XU Y, ZHAO G J, ZHU Y B, et al. Research progress on physiological changes and fresh keeping mechanism of Winter Jujube (DongZao)[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2020, 42(6): 90-95.]
- [5] ZHANG X Y, LIU Z J, ZHONG C, et al. Structure characteristics and immunomodulatory activities of a polysaccharide RGRP-1b from radix ginseng rubra[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 189: 980-992.
- [6] MUHAMMAD I, KWAK Y S, HAN C K, et al. Adaptogenic effects of *Panax ginseng* on modulation of cardiovascular functions[J]. *Journal of Ginseng Research*, 2020, 44(4): 538-543.
- [7] LI W Z, WANG Y F, ZHOU X B, et al. The anti-tumor efficacy of 20(S)-protopanaxadiol, an active metabolite of ginseng, according to fasting on hepatocellular carcinoma[J]. *Journal of Ginseng Research*, 2022, 46(1): 167-174.
- [8] 李曼微,陈雪,陈长宝.鲜参与生晒参药理活性差异的比较分析[J].*时珍国医国药*,2020,31(9):2124-2126. [LI M W, CHEN X, CHEN C B. Comparative analysis of pharmacological activity difference of fresh ginseng[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2020, 31(9): 2124-2126.]
- [9] 肖移聪,刘军,马梦亚,等.多糖-纳米材料复合涂层在水果保鲜中的研究进展[J].*食品与发酵工业*,2023,49(5):337-343. [XIAO Y C, LIU J, MA M Y, et al. Research progress of polysaccharide-nanomaterial composite coating in fruit preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(5): 337-343.]
- [10] 吴利敏,齐暑华,刘乃亮,等.纳米材料改性酚醛树脂研究进展[J].*中国胶粘剂*,2011,20(4):58-62. [WU L M, QI S H, LIU N L, et al. Research progress of PF modified by nanomaterial[J]. *China Adhesives*, 2011, 20(4): 58-62.]
- [11] 陈婕,梅林玉.聚乳酸/茶多酚复合包装膜的制备及性能[J].*包装工程*,2021,42(23):100-108. [CHEN J, MEI L Y. Preparation and properties of polylactic acid/tea polyphenol composite packaging film[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(23): 100-108.]
- [12] 刁润丽.纳米材料的应用研究进展[J].*佛山陶瓷*,2021,31(9):5-7. [DIAO R L. Research progress on the application of nanomaterials[J]. *Foshan Ceramics*, 2021, 31(9): 5-7.]
- [13] 祝钧,苏醒,张晓娟.纳米包装材料在果蔬保鲜中的应用[J].*食品科学*,2008,29(12):766-768. [ZHU J, SU X, ZHANG X J. Application of nanometer packing material in fruit and vegetable fresh-keeping[J]. *Food Science*, 2008, 29(12): 766-768.]
- [14] 孙新,黄俊彦,吴双岭,等.纳米复合包装材料的研究与应用进展[J].*塑料科技*,2012,40(12):100-103. [SUN X, HUANG J Y, WU S L, et al. Study and application progress of nano-composite packaging materials[J]. *Plastics Science and Technology*, 2012, 40(12): 100-103.]
- [15] 黄金,崔朝经,韩雪,等.多糖纳米材料制备、表征及在果蔬可食性涂膜中应用的研究进展[J].*食品工业科技*,2021,42(24):424-433. [HUANG J, CUI C J, HAN X, et al. Research progress on preparation, characterization and application of polysaccharide nanomaterials in edible coatings of fruits and vegetables[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(24): 424-433.]
- [16] 庞琬月.改性复合聚乙醇醇食品包装膜研究进展[J].*食品安全导刊*,2021(21):149-152. [PANG W Y. Research progress of modified composite polyvinyl alcohol food packaging film[J]. *China Food Safety Magazine*, 2021(21): 149-152.]
- [17] SHARMA B, MALIK P, JAIN P. Biopolymer reinforced nanocomposites: A comprehensive review[J]. *Materials Today Communications*, 2018, 16: 353-363.
- [18] ROY N, SENGUPTA R, BHOWMICK A K. Modifications of carbon for polymer composites and nanocomposites[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(6): 781-819.
- [19] CHOI R N, CHEIGH C I, LEE S Y, et al. Preparation and properties of polypropylene/clay nanocomposites for food packaging[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(8): N62-67.
- [20] DUAN N, LI Q, MENG X Y, et al. Preparation and characterization of k-carrageenan/konjac glucomannan/TiO₂ nanocomposite film with efficient anti-fungal activity and its application in strawberry preservation[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130441-130449.
- [21] BALASUBRAMANIAN R, KIM S S, LEE J, et al. Effect of TiO₂ on highly elastic, stretchable UV protective nanocomposite films formed by using a combination of k-Carrageenan, xanthan gum and gellan gum[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 23: 1020-1027.
- [22] 陈方飞,李小红,张治军.原位聚合法制备聚合物/纳米SiO₂复合材料的研究进展[J].*化学研究*,2011,22(5):99-105. [CHEN F F, LI X H, ZHANG Z J. Research progress of polymer/nano-silica composites by *in-situ* polymerization[J]. *Chemical Research*, 2011, 22(5): 99-105.]
- [23] SUN X X, WU Q L, PICHA DAVID H, et al. Comparative performance of bio-based coatings formulated with cellulose, chitin, and chitosan nanomaterials suitable for fruit preservation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 259: 117764-117776.
- [24] 高坤,孙印石,董昕瑜.人参保鲜技术研究现状[J].*特产研究*,2017,39(4):63-66. [GAO K, SUN Y S, DONG X Y. Study on the present status of *Panax ginseng* storage[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant*, 2017, 39(4): 63-66.]
- [25] 李亚丽,王荣灿,曲正义,等.脱落酸对储藏鲜参的生理活性及质量指标的影响[J].*食品工业*,2021,42(10):193-197. [LI Y L, WANG R C, QU Z Y, et al. Effects of abscisic acid on physiological activity and quality indexes of fresh ginseng[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(10): 193-197.]
- [26] 贾璐璐,李琼,王慧斌,等.不同基质对低温保鲜人参的影响[J].*中国中药杂志*,2017,42(13):2449-2452. [JIA L L, LI Q, WANG H B, et al. Effects of different substrates on low temperature fresh ginseng[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2017, 42(13): 2449-2452.]
- [27] HU W Z, XU P, UCHINO T. Extending storage life of fresh ginseng by modified atmosphere packaging[J]. *Journal of the Sci-*

ence of Food and Agricultural, 2005, 85(14): 2475-2481.

- [28] 王聪. 淀粉基人参涂膜保鲜剂的研制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014. [WANG C. Development of starch-based preservative coating ginseng[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014.]
- [29] GAO K, CHEN J B, WANG Y H, et al. Effects of ^{60}Co - γ and electron beam irradiation on storage quality of *Panax ginseng* [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(9): 1627-1638.
- [30] KANG S H, CHA H J, JUNG S W, et al. Application of chitosan-ZnO nanoparticle edible coating to wild-simulated Korean ginseng root [J]. *Food Science Biotechnology*, 2022, 31(5): 579-586.
- [31] 黄良, 刘全祖, 沈祖广, 等. 果蔬气调保鲜技术的发展现状[J]. 农业与技术, 2018, 38(3): 163-166. [HUANG L, LIU Q Z, SHEN Z G, et al. Development status of air conditioning fresh-keeping technology for fruits and vegetables[J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(3): 163-166.]
- [32] 陈韵洁, 张宜明, 庞林江, 等. 纳米复合材料涂膜在甘薯保鲜中的应用及优化[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 1-10. [CHEN Y J, ZHANG Y M, PANG L J, et al. Application and optimization of nanocomposite coating in preservation of sweet potato[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(23): 1-10.]
- [33] JUNQUEIRA-GONÇALVES M P, SALINAS G E, BRUNA J E, et al. An assessment of lactobionopolymer-montmorillonite composites for dip coating applications on fresh strawberries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(6): 1846-1853.
- [34] AFONSO P, JOAO R, LAURIANO S, et al. Chitosan/montmorillonite bionanocomposites incorporated with rosemary and ginger essential oil as packaging for fresh poultry meat[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 17(9): 142-149.
- [35] 王雪. 淀粉/乳酸接枝共聚物及其淀粉基薄膜的制备与性能研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018. [WANG X. Preparation and properties of starch/lactic graft copolymer and starch-based film[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.]
- [36] 马宁, 石学彬, 方勇, 等. 纳米包装材料对生菜保鲜品质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 281-285. [MA N, SHI X S, FANG Y, et al. Effects of nano-packaging materials on the quality preservation of lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. *Food Science*, 2012, 33(18): 281-285.]
- [37] 李志啸, 杨文建, 方东路, 等. 纳米包装材料对双孢菇细胞壁代谢及品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 248-253. [LI Z X, YANG W J, FANG D L, et al. Effects of nano-packaging on cell wall metabolism and postharvest qualities of *Agaricus bisporus* [J]. *Food Science*, 2016, 37(6): 248-253.]
- [38] XING Y, ZHEN H. Effects of polylactic acid antimicrobial films on preservation of Chinese rape [J]. *Packaging Technology and Science*, 2020, 33(11): 461-468.
- [39] 马清华, 蔡铭, 谢春芳, 等. 聚乙烯醇基 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 纳米包装膜制备及对双孢菇保鲜效果[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 182-187. [MA Q H, CAI M, XIE C F, et al. Evaluation of polyvinyl alcohol-based $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ nanocomposite films and their preservation effect on *Agaricus bisporus* [J]. *Food Science*, 2020, 41(9): 182-187.]
- [40] ZHANG R F, WANG X Y, LI L, et al. Optimization of konjac glucomannan/carrageenan / nano- SiO_2 coatings for extending the shelf-life of *Agaricus bisporus* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 122: 857-865.
- [41] YAN Y S, DUAN S Q, ZHANG H L, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan and pullulan composite films for strawberry preservation [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 243: 116446-116454.
- [42] 王乐, 闫宇壮, 方天驰, 等. 新型食品包装材料研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(9): 259-263. [WANG L, YAN Y Z, FANG T C, et al. Research progress of new food packaging materials [J]. *The Food Industry*, 2021, 42(9): 259-263.]
- [43] KANG M L, GU J J, GUO X L. Garlic oil -sodium carboxymethyl cellulose composite coating material improving strawberry preservation effect [J]. *Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer*, 2016, 32(14): 300-305.
- [44] 孙宛茹, 贾仕奎, 孙焱焱, 等. 多糖类可食性膜的改性与应用研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(6): 52-55. [SUN W R, JIA S K, SUN Y Y, et al. Progress on modification and application of polysaccharide edible film [J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(6): 52-55.]
- [45] 史庆平, 李东立, 许文才. 基于乙烯含量控制的果蔬保鲜包装技术发展现状[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 117-121. [SHI Q P, LI L D, XU W C. Development of fruit and vegetables fresh-keeping packaging technology based on ethylene control [J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(7): 117-121.]
- [46] JUNG S H, CUI Y F, BARNES M, et al. Multifunctional bionanocomposite coatings for perishable fruits [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(26): 1908291-1908299.
- [47] 吕佳美悦. 羧甲基壳聚糖/纳米材料复合膜的研制[D]. 泉州: 华侨大学, 2012. [LÜ J M Y. Research of making the carboxymethyl chitosan/nanomaterial composite film [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2012.]
- [48] 赵悦菡, 侯召华, 纪海鹏, 等. 樱桃生理变化及保鲜机理研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(23): 197-203. [ZHAO Y H, HOU S H, JI H P, et al. Advance in research on physiological changes and fresh-keeping mechanism of cherries [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(23): 197-203.]
- [49] 曾丽萍, 孟金明, 樊爱萍, 等. 外源 NO 联合壳聚糖/纳米 TiO_2 涂膜复合处理对枇杷保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 36-41. [ZENG L P, MENG J M, FAN A P, et al. Effects of exogenous NO combined with chitosan/nano- TiO_2 coating on preservation effect of loquat fruit [J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(3): 36-41.]
- [50] 张蓓, 冯叙桥, 韩鹏祥, 等. 蜂胶/纳米 SiO_2 复合涂膜对圣女果成熟与衰老过程中相关酶活性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(2): 159-165. [ZHANG B, FENG X Q, HAN P X, et al. Effects of propolis/Nano-silica composite coating on activities of ripening and senescence related enzymes in cherry tomato fruits [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(2): 159-165.]
- [51] ZHANG S L, MA M, ZHANG H P, et al. Genome-wide analysis of polygalacturonase gene family from pear genome and identification of the member involved in pear softening [J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 587-598.
- [52] LI C Y, ZHANG J H, GE Y H, et al. Postharvest acibenzolar-S-methyl treatment maintains storage quality and retards softening of apple fruit [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(3): e13141-13148.
- [53] DE OLIVEIRA FILHO J G, MIRANDA M, FERREIRA M D, et al. Nanoemulsions as edible coatings: A potential strategy for fresh fruits and vegetables preservation [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2438-2454.
- [54] PLOY K, RUNGSINEE S. Active coating from hydroxypropyl methylcellulose-based nanocomposite incorporated with Thai essential oils on mango (cv. Namdokmai Sithong) [J]. *Food Bioscience*, 2018, 23: 9-15.

- [55] CHU Y F, GAO C C, LIU X Y, et al. Improvement of storage quality of strawberries by pullulan coatings incorporated with cinnamon essential oil nano emulsion[J]. *LWT*, 2020, 122: 109054–109061.
- [56] 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, 39(7): 60–64. [LUO C, DONG Z, ZHUANG S J, et al. The effect of nano-silver antibacterial package on the quality of shrimp meat during cold storage[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(7): 60–64.]
- [57] HUANG Y, MEI L, CHEN X, et al. Recent developments in food packaging based on nanomaterials[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2018, 8(10): 830–858.
- [58] 隋思瑶, 马佳佳, 陆皓茜, 等. 纳米二氧化钛抗菌防雾膜的制备表征及对草莓的保鲜效果(英文)[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 302–310. [SUI S Y, MA J J, LU H Q, et al. Characterization and preparative effect of anti-fogging film prepared with nano-TiO₂[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(5): 302–310.]
- [59] 吴黎明, 蒋迎春, 何利刚, 等. 纳米材料对夏橙贮藏保鲜效果的影响[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(23): 5776–5779. [WU L M, JIANG Y L, HE L G, et al. Effect of nanomaterials on preservation quality of valencia orange[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(23): 5776–5779.]
- [60] 于子越, 陈飞, 董威杰, 等. 纳米银的抑菌机理及其在食品储藏方面的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 305–309. [YU Z Y, CHEN F, DONG W J, et al. Antibacterial mechanism of nano-silver and its research progress in food storage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 305–309.]
- [61] YANG F M, LI H M, LI F, et al. Effect of nano-packing on preservation quality of fresh strawberry (*Fragaria ananassa* Duch. cv Fengxiang) during storage at 4 degrees C[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(3): C236–240.
- [62] 罗自生, 叶轻飏, 李栋栋. 纳米二氧化钛改性 LDPE 薄膜包装对草莓品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(10): 2340–2344, 2537. [LUO Z S, YE Q Y, LI D D. Influence of nano-TiO₂ modified LDPE film packaging on the quality of strawberry[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(10): 2340–2344, 2537.]
- [63] 张瑶, 杨京平, 杨莹跃, 等. 添加纳米粒子的塑料包装材料在杨梅保鲜中的作用[J]. *农机化研究*, 2007, 143(3): 111–114. [ZHANG Y, YANG J P, YANG Y Y, et al. The application of Ag nanometer antimicrobial on the preservation of waxberry[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007, 143(3): 111–114.]
- [64] LI D D, YE Q Y, JIANG L, et al. Effects of nano-TiO₂-LDPE packaging on postharvest quality and antioxidant capacity of strawberry(*Fragaria ananassa* Duch.) stored at refrigeration temperature[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(4): 1116–1123.
- [65] BUMBUDSANPHAROK N, CHOI J, PARK H J, et al. Zinc migration and its effect on the functionality of a low-density polyethylene-ZnO nanocomposite film[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 20: 100301–100308.
- [66] MANIVONG S, GARCIA A A, PATTEN S A, et al. Chitosan-based nanogels: Synthesis and toxicity profile for drug delivery to articular joints[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(8): 1337–1353.
- [67] KRÓL A, POMASTOWSKI P, RAFIŃSKA K, et al. Zinc oxide nanoparticles: Synthesis, antiseptic activity and toxicity mechanism[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 249: 37–52.
- [68] WU Z, ZHANG B, YAN B. Regulation of enzyme activity through interactions with nanoparticles[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, 10: 4198–4209.
- [69] ADJEI IM, SHARMA B, LABHASETWAR V. Nanoparticles: cellular uptake and cytotoxicity[J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2014, 811: 73–91.