

环境友好型复合纳米材料在食品包装中的应用

魏海英¹, 郭红军¹, 陈强²

(1.齐鲁工业大学, 济南 250353; 2.北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: 目的 综述环保纳米包装材料的最新进展, 为食品包装行业提供理论指导。方法 从活性包装、智能包装和生物基包装这3个方面进行阐述, 再对其安全性进行分析。结果 纳米材料因其独特的尺寸效应, 优异的物理化学性能、生态性能和加工性能等, 使之在包装领域, 尤其是食品包装得到了广泛的关注与应用, 但需重点关注其安全性问题。结论 纳米材料能有效改善包装材料的性能, 使包装材料智能化, 虽然该研究尚处于起步阶段, 但纳米技术在食品包装领域具有显著的发展前景。由于可参考的数据不够充分, 纳米材料的毒性问题以及迁移到食品中的安全性等还需进一步研究。

关键词: 活性包装; 智能包装; 生物基包装

中图分类号: TB484.9; TS206.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)19-0029-06

Application of Environmentally Friendly Nanocomposites in Food Packaging

WEI Hai-ying¹, GUO Hong-ge¹, CHEN Qiang²

(1.Qilu University of Technology, Jinan 250353, China;

2.Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the latest advances in environmentally friendly nano-packaging materials to provide the theoretical instructions for the food packaging industry. The recent advances in food nano-packaging included active packaging, smart packaging and bio-based packaging. Finally, the safety of such materials was analyzed. Due to the unique size effect of nano-materials, it exhibited excellent physical and chemical properties, ecological performance and processing performance in the packaging fields, especially food packaging. As a result, it attracted a wide range of attentions and applications. However, close attention should be paid to the safety issues. The nano-materials could effectively improve the performance and intelligentize of the packaging materials. Although still in its infancy, it was believed that the nanotechnology in the field of food packaging was to be significantly prospective. Because the reference data are not enough, the toxicity of nanomaterials and the safety of migration to food still need to be further researched.

KEY WORDS: active packaging; smart packaging; bio-based packaging

纳米技术是20世纪新兴的一种高科技技术^[1], 在医学、化工和包装等领域应用广泛。纳米技术可用来制造、操作或表征具有至少一个维度是纳米尺寸的结构、器件或材料。由于纳米材料尺寸小、反应活性高等^[2], 呈现出与宏观材料非常不同的性质, 如优异的物理化学性能、力学性能、加工性能和生态性等^[3], 可以产生对人类至关重要的影响^[4]。根据纳米材料的尺寸, 可将纳米材料分为3类^[5]: 具有三维纳米尺度的纳米球或纳米颗粒; 具有2个纳米尺度的纳米晶须

(纳米棒)和纳米管; 只有1个纳米尺度的纳米膜或纳米片材。在包装系统中, 为了保护、控制、分配、运输和识别供应链中的每个物品, 纳米技术可以用于供应链的任何环节^[6]。这是因为纳米材料可以为包装材料带来许多先进的功能特性, 目前正越来越多地用于食品包装行业。据报道, 大约500种纳米包装产品正在进行商业化使用, 而纳米技术预计将用于制造未来10年占比为25%的食品包装^[7]。此外, 纳米技术也可以设计用于释放抗菌剂、抗氧化剂等以延长保质

收稿日期: 2017-08-22

作者简介: 魏海英(1990—), 女, 齐鲁工业大学硕士生, 主攻印刷包装材料。

通讯作者: 郭红军(1969—), 女, 齐鲁工业大学副教授, 主要研究方向为高分子结构与性能。

期^[8]。新的食品包装纳米技术产品正在开发使用中,一些提高食品和乳制品保质期的抗菌薄膜已经进入市场^[9]。此外,纳米材料可以改善常规包装材料的阻隔性能、机械强度、耐热性、阻燃性和氧化稳定性等^[10]。

纳米技术在新型食品包装中,尤其是在农业食品行业将最具发展优势。食品包装和监测是食品工业相关纳米技术研发的重点^[11]。食品包装中领先发展的是活性包装和智能包装,两者都致力于提高食品安全和质量,优化产品保质期^[12]。此外,包装行业中,大部分包装材料是不可降解的石油基聚合物塑料,会造成非常严重的环境问题。生物基材料由于其可生物降解性和可再生自然资源的衍生性成为塑料包装材料合适的替代品,但适用于食品包装的生物基材料非常有限,因为天然聚合物具有较差的阻隔性和较弱的力学性能,不能满足包装的所有要求^[13]。纳米技术的应用可以提高生物基包装材料的性能,但是食品接触含有纳米物质的材料可能会产生安全问题^[14],因此需要优化新型的功能包装材料,如采用智能包装^[15~16]。虽然该技术获得了一定的成果,但生物纳米复合材料的道路仍然很长^[2,16]。这里从活性包装、智能包装、生物基包装等方面阐述食品包装的进展。

1 包装分类

按照表现的特点,包装材料分为3类^[17],即传统包装、活性包装和智能包装。纳米材料的添加可向食品包装系统提供“活性”或“智能”性质,如抗微生物性能、除氧能力、酶固定化或暴露于某些有害因素的程度指示等^[10],因此这里着重介绍活性包装和智能包装。纳米技术主要应用在提高包装性能(如柔韧性,阻隔,温度和水分稳定性)^[18]、活性食品接触材料(含纳米颗粒具有抗菌性能)^[19]、监测和报告食物状况的智能纳米传感器^[20]和可生物降解的聚合物纳米复合材料^[21]等几个方面。

1.1 活性包装

活性包装就是将纳米材料与食品或环境直接相互作用,积极地反映内部和外部的环境变化,以更好地保护产品,如抗菌包装、保鲜包装等。抗菌包装是最重要的包装类型之一,食品包装材料应具有抗菌性能,以防止贮存期间食物中微生物的生长^[22]。许多研究人员对纳米材料(纳米铜^[23]、纳米银^[24]、纳米氧化镁、纳米二氧化钛^[25]和碳纳米管等^[26~27])的抗微生物活性进行了研究,结果表明,纳米颗粒对微生物的作用与细菌细胞质膜的渗透性变化有关^[28]。纳米颗粒主要分布在细胞质膜和细胞壁上^[28],利用纳米材料高的表面体积比和增强的表面反应性,可使微生物分子细胞失活,从而延长食品保质期^[29]。可通过多种方式增强包装材料的抗菌性^[30],如添加含有抗微生物剂

的附件袋,将抗微生物剂直接加入聚合物材料中或涂覆在聚合物表面上,使用自身具有抗菌性的聚合物材料等。食品包装中最常见的抗微生物膜基于银纳米颗粒,银纳米颗粒具有高温稳定性和低挥发性,且对许多微生物具有强烈的毒性^[24]。此外,涂覆纳米二氧化钛的膜对水中的大肠杆菌具有抑制作用,据报道,银掺杂的纳米二氧化钛复合材料可以增强复合材料的可见光吸收性,并增加其在UV照射下的光催化活性,可大大改善光催化细菌灭活的效果^[31]。

传统的果蔬保鲜方式为物理保鲜、化学保鲜和生物保鲜等,它们都可以达到一定的保鲜效果^[32]。将纳米材料与现有的保鲜技术相结合,能有效弥补现有保鲜方法存在的不足。如紫外线照射这一常用的保鲜方式,长期的紫外线照射不仅会导致肉类食品因自动氧化而变质,而且会破坏食品中的纤维素和芳香类化合物,降低食品营养价值。在保鲜包装材料中加入纳米银粉或在薄膜表面沉积纳米厚度的银,均可对包装物中的微生物进行灭菌,延长食品的货架期^[33]。该灭菌原理是纳米银颗粒的加入可以加速氧化果蔬食品释放出的乙烯,从而减少包装中的乙烯含量,达到良好的保鲜效果^[33]。此外,纳米材料的加入,可有效抑制果蔬等食品的呼吸作用,延长果蔬的新鲜状态^[34]。Luo等^[35]通过将银纳米粒子胶体溶胶与聚乙烯母料混合,然后利用吹膜法制备银质量分数为0.0086%的银纳米粒子-聚乙烯共混膜,结果表明,该共混膜对葡萄球菌和大肠杆菌均具有有效的抗菌活性,梨果包装应用表明,该膜对于水果和蔬菜具有有效的保鲜能力。

目前纳米材料在果蔬贮藏保鲜中还存在一些问题需要解决。首先,纳米材料的加入提高了保鲜成本;其次,纳米材料的稳定性差,容易在环境中扩散;此外,目前能够应用于果蔬保鲜中的纳米材料种类较少,应不断地进行研究开发^[32];最后,纳米材料的安全性能能否得到保障,人体对纳米材料的吸收要高于其他物质,因此必须全面深入研究它的安全性。

1.2 智能包装

智能包装也属于活性包装的范畴,可用于检测食品中的生物化学或微生物变化,不同之处在于其提供了智能化作用,方便与用户沟通,例如用于检测食品特定的病原体或特定气体的纳米传感器。纳米传感器在食品行业中的应用主要是可以对食品的温度变化、水分含量、农药残留、内部或外部状况、某些化合物、病原体和毒素等进行“实时”和“在线”检测,提供食物新鲜度的实时状态,必要时控制释放食品防腐剂^[36]。例如塑料包装中的工程传感器能够响应环境变化(温度、湿度和氧气暴露程度等)或微生物污染等状况,检测出食物释放的气体,从而引起包装颜色的变化^[37]。目前纳米传感器已被开发和商业化应用,以检测病原体、化学污染物或通过加工链来跟踪成分变化^[38]。此

外, 基于多壁碳纳米管的生物传感器已得到开发使用, 可检测食品或饮料中的微生物、有毒蛋白质和降解产物^[38]。目前, 采用射频识别标签和核酸工程纳米生物条码技术能够以更经济和更有效的方式跟踪供应链中的食品状态, 如可指示家禽产品新鲜度的视觉质量标签, 当肉类制品开始变质时, 银纳米层与硫化氢之间的反应引起标签颜色的变化^[36]。

2 生物基包装

2.1 生物基聚合物特点

由于日益加剧的环境污染问题, 传统的包装聚合物应用受到限制。开发可以取代传统石油衍生的聚合物, 且可保持其性质的可生物降解聚合物是未来应用的方向^[39—40]。生物基包装是可生物降解的包装薄膜, 可应用于控制水分转移或气体交换以便提高食品安全性并保持营养和感官质量^[41], 它可通过活生物体的作用而衰变^[42], 释放 H₂O、CO₂和其他一些生物体, 没有毒性, 对环境没有污染, 因此比传统包装材料更环保, 但用于食品包装的生物基材料的使用目前仍然受到限制。与传统的石油基聚合物相比, 生物基聚合物塑料的脆性、低温变形温度、阻隔性能以及制备成本等严重限制了其使用范围^[43], 将纳米技术应用于这些聚合物既可以提高性能, 又可以降低成本。

生物基聚合物被认为是可生物降解包装材料的理想来源, 具备以下特点^[44—45]: 良好的生物相容性; 可生物降解性, 可用于与酸性、油性等食品的直接接触; 具有可再生的生物资源, 是不可再生包装材料和不可生物降解生物基聚合物的主要环保替代品; 降解一般不会释放污染物, 而是在氢、碳和氧的环境下, 聚合物矿化产生 H₂O、CO₂等; 具有可用于化学改性的官能团^[46], 许多添加剂如抗真菌剂、抗微生物剂和抗氧化剂等, 可以通过化学反应添加到生物基聚合物中^[22]。

2.2 生物基聚合物分类

生物基聚合物大致分 3 类^[22], 即天然生物基聚合物(淀粉、壳聚糖、纤维素等)、合成可生物降解聚合物(聚乳酸、聚乙烯醇、聚乙醇酸等)以及微生物发酵过程产生的生物基聚合物(聚-β-羟基烷酸、普鲁兰多糖、热凝胶等)。所有的生物基聚合物都可以在各种生物体的代谢中至少发生一步降解, 降解的副产物是无毒且环保的。易脆、高气体渗透性、低温变形和长时间加工操作性差等是其用于包装的主要限制。在合成聚合物领域中, 生物基纳米复合材料的成功应用促进了基于生物基聚合物食品包装材料的应用发展^[16]。

2.3 应用

纳米粒子在聚合物包装中的应用分为两类。

1) 纳米材料与聚合物树脂共混, 纳米材料主要用作增强材料。共混有 3 种方法: 纳米材料作为填料直接熔融共混; 对纳米材料进行表面处理包覆, 然后共混; 对纳米材料进行插层化学改性, 与主体树脂发生化学反应共混, 形成纳米复合物。

2) 对聚合物薄膜进行纳米材料表面处理。如利用磁控溅射法沉积氧化锌(ZnO)^[47], 利用原子层沉积技术在聚合物表面沉积纳米氧化铝^[48]、氧化硅^[49]以及真空蒸镀铝等方法^[50]。

目前, 研究最多的生物纳米复合材料是淀粉和聚酯材料, 如聚乳酸、聚丁二烯酸丁二酯和脂族聚酯等。聚乳酸具有良好的生物相容性和可生物降解性, 但其耐应力差、降解缓慢等特性限制了其应用^[51], 纳米技术的应用可以很好地改变其性能。Marraa^[52]等将聚乳酸(PLA)与质量分数分别为 1%、3% 和 5% 的 ZnO 混合制备生物复合薄膜, 结果显示, 复合薄膜的氧气和二氧化碳透过率有所下降。纯 PLA、PLA/ZnO(1%), PLA/ZnO(3%), PLA/ZnO(5%) 薄膜的氧气透过率分别为 (2.23±0.22), (1.83±0.03), (1.81±0.24), (1.84±0.06) cm³/(m²·d), 二氧化碳透过率分别为 (8.00±0.20), (6.67±0.14), (6.96±0.04), (6.86±0.26) cm³/(m²·d), 可以看到, PLA/ZnO(1%) 复合薄膜对气体的阻隔性最好, 这可能与纳米 ZnO 在薄膜中的均匀分布有关。Yu^[53]等利用纳米银颗粒对聚羟基脂肪酸酯(PHA)进行改性, 结果表明, 与纯 PHA 相比, 含有银纳米颗粒和纤维素纳米晶体的 PHA 生物基聚合物显示出较好的机械强度。此外, 生物基聚合物也可同时用于活性包装和智能包装^[6]。必须强调的是, 含有纳米颗粒的食品包装材料可能会影响食品的味道、颜色、风味、质地和营养等^[17]。纳米颗粒之间的范德华力可促进团聚体的形成, 实现纳米颗粒在聚合物基质中的均匀分散仍然很困难^[54], 如亲水性纳米颗粒和疏水性聚合物的相容性差, 从而导致较差的界面粘合, 使得复合薄膜整体性能较低。纳米复合材料有可能表现不出纳米颗粒的性能, 这就会限制其有效应用^[14]。

随着研究的不断深入, 纳米材料在食品包装领域主要向以下几个方向发展^[55]: 通过在聚合物基质中添加纳米材料, 开发具有改进性能的材料, 即改性包装, 赋予其柔韧性、更好的阻隔性和温度/湿度的稳定性等; 通过纳米系统开发活性包装, 允许包装材料与食品和环境之间的相互作用, 在食品保鲜中发挥动态作用; 通过在聚合物基质中添加纳米器件来开发智能包装, 以检测食品或食品周围环境的状况, 保证食品的质量和安全。

3 安全性

由于纳米粒子生产和应用的大量增加, 它们对环境和人类健康的影响需要系统研究^[17]。纳米材料的尺

寸、溶解性、化学组成、表面结构、形状以及聚集状态等均会影响其生物学效应^[3], 对生物体可能产生有害的影响。纳米颗粒主要通过3种方式进入人体, 即吸入、摄入和穿透^[56]。研究显示, 纳米颗粒通过细胞膜的渗透可能会引起某些炎症反应和氧化损伤^[22]。另外, 对于纳米材料进入体内后的归宿如何、作用如何等问题都尚未解决, 因此要确定纳米材料是否真正安全还需要进行大量的深入研究^[3]。尽管有关纳米颗粒从包装材料迁移到食品的科学数据有限, 但一旦纳米材料存在于食品包装材料中, 纳米颗粒或多或少会迁移到食物中, 进入人体^[56]。

纳米材料对环境也有可能产生影响, 有关环境中纳米材料的持久性、循环周期和毒性等问题有很多。如空气中含有通过焚烧产生的纳米级超微粉尘或粉尘, 它们会渗入土壤中, 由于其表面活性和体积小而与有机物质或重金属结合, 可能会导致地下水污染^[22], 所以在纳米材料的加工和使用过程中必须采取一些预防措施^[22]。

4 结语

纳米材料具有十分诱人的应用前景, 已在食品科学应用中起到了关键的作用, 纳米技术几乎在所有的科技领域都开辟了新的视野。在食品包装领域中, 纳米技术的应用预计将贯穿整个食品链为食品行业带来巨大效益。纳米技术能改善食品的营养功能、安全性和食品品质, 推进整个食品科学领域的快速发展。

人们对纳米材料和技术的了解和应用还需进行深入的研究, 包括以下4个方面: 发展与完善纳米材料的制备和合成技术, 只有在了解的基础上进行生产, 才能减少限制; 纳米材料在食品包装过程中的迁移规律及纳米材料的毒性, 纳米颗粒能够发生迁移, 通过渗透或者扩散等形式进入人体, 可能会产生不利影响, 如使人体重要的酶活性受到损坏、遗传物质得到突变、中枢神经系统变得紊乱等, 纳米材料的安全性仍需深入研究; 纳米材料应用的标准, 我国乃至国际上都没有对纳米食品行业制定一个统一的标准, 无法对纳米食品进行安全性评价, 这不利于食品安全的管控; 开发具有纳米结构的可食性天然包装材料。随着对纳米材料研究的不断深入, 纳米材料将在各个领域中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 王针针. 纳米技术在食品科学工程中的应用[J]. 现代食品, 2017(1): 82—83.
WANG Zhen-zhen. Application of Nanotechnology in Food Science Engineering[J]. Modern Food, 2017(1): 82—83.
- [2] DILMA N T. Chapter 14: Intelligent Systems in the Food Packaging Industry, Contaminant Sensors and Security/Anticounterfeiting Devices[J]. Nanotechnology Applications in Food, 2017(1): 287—306.
- [3] 杨龙平, 章建浩, 黄明明, 等. 纳米材料在食品包装中的应用及安全性评价[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 19—23.
YANG Long-ping, ZHANG Jian-hao, HUANG Ming-ming, et al. Application and Safety Evaluation of Nanomaterial in Food Packaging[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 19—23.
- [4] SOZER N, KOKINI J L. Nanotechnology and Its Applications in the Food Sector[J]. Trends in Biotechnology, 2009, 27(2): 82—89.
- [5] AZEREDO C D. Nanocomposites in Food Packaging: A Review[J]. Intech, 2011(1): 57—78.
- [6] KUSWANDI B. Environmental Friendly Food Nano-packaging[J]. Environmental Chemistry Letters, 2017(1): 1—17.
- [7] REYNOLDS G. FDA Recommends Nanotechnology Research, but Not Labelling[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2007.
- [8] CHA D S, CHINNAN M S. Biopolymer-Based Antimicrobial Packaging: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2004, 44(4): 223.
- [9] PLASTICS N G. Consumers and Regulators Push Food Packaging Innovations[J]. Plastics News, 2005, 96(12): 36—38.
- [10] AYHAN Z, CIMMINO S, ESTURK O, et al. Development of Films of Novel Polypropylene Based Nanomaterials for Food Packaging Application[J]. Packaging Technology & Science, 2015, 28(7): 589—602.
- [11] BRODY A L. "Nano, Nano" Food Packaging Technology[J]. Food Technology, 2003, 57(12): 52—58.
- [12] KUSWANDI B, WICAKSONO Y, ABDULLAH A, et al. Smart Packaging: Sensors for Monitoring of Food Quality and Safety[J]. Sensing & Instrumentation for Food Quality & Safety, 2011, 5(3): 137—146.
- [13] HENDRIX K M, MORRA M J, LEE H B, et al. Defatted Mustard Seed Meal-based Biopolymer Film Development[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(1): 118—125.
- [14] SABLANI S S. Polymer Nanocomposites for Food Packaging Applications[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- [15] DOBRUCKA R, CIERPISZEWSKI R, KORZENIOWSKI A. Intelligent Food Packaging: Research and Development[J]. Log Forum, 2015, 11(1): 7—14.
- [16] SORRENTINO A, GORRASI G, VITTORIA V. Potential Perspectives of Bio-nanocomposites for Food Packaging Applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(2): 84—95.
- [17] REZIĆ I, HARAMINA T, REZIĆ T. Metal Nanoparticles and Carbon Nanotubes: Perfect Antimicrobial Nano-fillers in Polymer-based Food Packaging Mate-

- rials[J]. *Food Packaging*, 2017(1): 497—532.
- [18] PRIOLO M A, HOLDER K M, GAMBOA D, et al. Influence of Clay Concentration on the Gas Barrier of Clay-polymer Nanobrick Wall Thin Film Assemblies[J]. *Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids*, 2011, 27(19): 12106—12114.
- [19] JIN T, HE Y. Antibacterial Activities of Magnesium Oxide (MgO) Nanoparticles Against Foodborne Pathogens[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2011(12): 6877—6885.
- [20] NEETHIRAJAN S, FREUND M S, JAYAS D S, et al. Development of Carbon Dioxide (CO_2) Sensor for Grain Quality Monitoring[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 395—404.
- [21] ECHEGOYEN Y, NER N C. Nanoparticle Release from Nano-silver Antimicrobial Food Containers[J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2013, 62: 16—22.
- [22] MOHANTY F, SWAIN S K. Chapter 18: Bionano-composites for Food Packaging Applications[J]. *Nanotechnology Applications in Food*, 2017(1): 363—379.
- [23] TAMAYOA L, CARA M, KOGANB M, et al. Copper-polymer Nanocomposites: An Excellent and Cost-effective Biocide for Use on Antibacterial Surfaces[J]. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2016, 69: 1391—409.
- [24] KUMAR R, MUNSTEDT H. Silver Ion Release from Antimicrobial Polyamide/silver Composites[J]. *Biomatials*, 2005, 26(14): 2081—2088.
- [25] MANESS P C, SMOLINSKI S, BLAKE D M, et al. Bactericidal Activity of Photocatalytic TiO_2 Reaction: toward an Understanding of Its Killing Mechanism[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 1999, 65(9): 4094—4098.
- [26] CHAUDHRY Q, SCOTTER M, BLACKBURN J, et al. Applications and Implications of Nanotechnologies for the Food Sector[J]. *Food Additives & Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2008, 25(3): 241.
- [27] BAUGHMAN R H, ZAKHIDOV A A, HEER W A D. Carbon Nanotubes[J]. *Science*, 2002, 297: 787—793.
- [28] NEZ A J, VARGAS M, CHIRALT A. Antimicrobial Nanocomposites for Food Packaging Applications: Novel Approaches[J]. *Novel Approaches of Nanotechnology in Food*, 2016(1): 347—386.
- [29] AZEREDO H M. Antimicrobial Activity of Nanomaterials for Food Packaging Applications [J]. *Nano-Antimicrobials*, 2012(1): 375—394.
- [30] APPENDINI P, HOTCHKISS J H. Review of Antimicrobial Food Packaging[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2002, 3(2): 113—126.
- [31] PRATAP R M, VENUGOPAL A, SUBRAHMANYAM M. Hydroxyapatite-supported Ag-TiO₂ as Escherichia Coli Disinfection Photocatalyst[J]. *Water Research*, 2007, 41(2): 379—386.
- [32] 王馨, 胡文忠, 陈晨, 等. 纳米材料在果蔬保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2017(1): 281—286.
- WANG Xin, HU Wen-zhong, CHEN Chen, et al. Application of Nanomaterials in Storage of Fruits and Vegetables[J]. *Food and Fermentation Industries Editorial Staff*, 2017(1): 281—286.
- [33] 李红梅. 食品纳米包装材料的制备及对食品保鲜作用的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- LI Hong-mei. Preparation of Nano-packaging and Effect on Preservation Quality of Food[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [34] 张磊, 张吉恒. 果蔬保鲜贮藏条件及其原理[J]. 北方经贸, 2016(5): 33—38.
- ZHANG Lei, ZHANG Ji-heng. Preservation and Storage of Fruit and Vegetable and Its Principle[J]. *Northern Economy and Trade*, 2016(5): 33—38.
- [35] LUO S Y, CHEN J, CHEN M, et al. Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Colloidal Sol and Its Application in Package Film[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(1): 254—259.
- [36] SUN-WATERHOUSE D, WATERHOUSE G I N. Recent Advances in the Application of Nanomaterials and Nanotechnology in Food Research[J]. *Novel Approaches of Nanotechnology in Food*, 2016(1): 21—66.
- [37] BOUWMEESTER H, DEKKERS S, NOORDAM M Y, et al. Review of Health Safety Aspects of Nanotechnologies in Food Production[J]. *Regulatory Toxicology & Pharmacology*, 2009, 53(1): 52—62.
- [38] NACHAY K. Analyzing Nanotechnology[J]. *Food Technology*, 2007(1): 34—36.
- [39] GONZ L A, IGARZABAL C A. Nanocrystal-reinforced Soy Protein Films and Their Application as Active Packaging[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43(1): 777—784.
- [40] GONZ L A, IGARZABAL C A. Soy Protein: Poly(Lactic Acid) Bilayer Films as Biodegradable Material for Active Food Packaging[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 33(2): 289—296.
- [41] SIRACUSA V, ROCCULI P, ROMANI S, et al. Biodegradable Polymers for Food Packaging: a Review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2008, 19(12): 634—643.
- [42] NOBILE M, CONTE A, BUONOCORE G, et al. Active Packaging by Extrusion Processing of Recyclable and Biodegradable Polymers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(1): 1—6.
- [43] HENRIETTEMCD E A. Nanocomposites for Food Packaging Applications[J]. *Food Research International*, 2009, 42(9): 1240—1253.
- [44] CHEN W Y, SUZUKI T, LACKNER M. *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [45] ENRICO D, LIDIETTA G. Biopolymers[J]. *Encyclopedia of Membranes*, 2016(1): 242.

- [46] GONZ L A, CONTRERAS C B, IGARZABAL C A, et al. Study of the Structure/Property Relationship of Nanomaterials for Development of Novel Food Packaging[J]. *Food Packaging*, 2017(1): 265—294.
- [47] PARK J, LEE I, KIM J. Physical Properties of Zinc-Tin-Oxide Thin Films Deposited on Sapphire Substrates by an Rf-Magnetron Sputtering Method[J]. *Science of Advanced Materials*, 2017(2): 285—289.
- [48] JUNG H, CHOI H, JEON H, et al. Radio Frequency Plasma Power Dependence of the Moisture Permeation Barrier Characteristics of Al_2O_3 Films Deposited by Remote Plasma Atomic Layer Deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(17): 234—246.
- [49] CHOI D W, CHUNG K B, PARK J S. Rapid Vapor Deposition SiO_2 Thin Film Deposited at a Low Temperature Using Tris(tert-pentoxy) Silanol and Trimethyl-aluminum[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013(2): 614—618.
- [50] KELLY R L, RICE P J. Vacuum Evaporation of Aluminum[J]. *Vacuum*, 1954, 4(3): 379.
- [51] RASAL R M, JANORKAR A V, HIRT D E. Poly(Lactic Acid) Modifications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2010(3): 338—356.
- [52] MARRA A, SILVESTRE C, DURACCIO D, et al. Polylactic Acid/Zinc Oxide Biocomposite Films for Food Packaging Application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016(1): 254—262.
- [53] YU H, SUN B, ZHANG D, et al. Reinforcement of Biodegradable Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) with Cellulose Nanocrystal/Silver Nanohybrids as Bifunctional Nanofillers[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014(4): 8479—8489.
- [54] JUDEINSTEIN P, SANCHEZ C. Hybrid Organic-inorganic Materials: A Land of Multi-disciplinarity[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 1996, 6(4): 511—525.
- [55] SILVESTRE C, DURACCIO D, CIMMINO S. Food Packaging Based on Polymer Nanomaterials[J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36(12): 1766—1782.
- [56] AZEREDO C D. Antimicrobial Nanostructures in Food Packaging[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 30(1): 56—69.