

控释技术在食品活性包装中应用与研究

应丽莎, 赵东方, 付海蛟, 胡蓉, 邹凯, 张敏*
(西南大学食品科学学院, 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘要: 食品包装控释系统是指包装材料作为传送系统进行活性物质的控制释放, 目的在于维持或改善包装内食品的品质。本文阐述控释技术在食品活性包装中的应用、活性物质释放机理、释放速率影响因素等最新研究进展, 展望控释技术未来的研究方向。

关键词: 控释; 食品; 活性包装; 扩散

Advances in Research into Controlled-Release Technology and Its Application in Active Food Packaging

YING Li-sha, ZHAO Dong-fang, FU Hai-jiao, HU Rong, ZOU Kai, ZHANG Min*
(Chongqing Special Food Programme and Technology Research Center, College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Food controlled-release system is based on packaging materials as a delivery system for the controlled release of active substances, which can realize the maintenance and improvement of food quality. In this article, the latest advances in the application of controlled-release technology in active food packaging and in research into the release mechanism and factors affecting the release rate are reviewed. Moreover, the future development trend of controlled-release technology is also proposed.

Key words: controlled release; food; active packaging; diffusion

中图分类号: TS206.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)09-0335-06

为延长食品货架期并保证其在市场销售期间的质量, 往往需要在食品体系中使用抗菌剂及抗氧化剂等各种食品添加剂。传统的使用方式直接将添加剂添加到食品中或配成溶液进行浸渍及喷洒等处理。然而这些方法存在明显的局限性: 添加到食品体系的添加剂的活性成分会因发生中和、分解等一系列复杂反应而被消耗殆尽, 从而丧失对食品的保护能力; 在食品储存和销售过程中, 大多数微生物和氧化腐败反应集中发生在食品表面, 而浸渍及表面喷洒会使添加剂从表面扩散进食品内部, 导致活性因子被整个食品介质稀释, 食品表面的有效浓度降低, 活性下降^[1-3], 这种现象在表面不致密的食品中尤为突出。

近年来, 活性包装作为一种新型的贮藏方法正在兴起, 它旨在提高食品的品质及安全性。当前, 众多活性包装技术主要关注于向聚合物基质掺杂活性因子, 使材料具备持留或释放有益物质的能力^[4-5], 其中材料对活

性因子的可控释放即控释系统成为研究的热点。食品包装控释系统指的是以包装材料为传送载体, 释放抗菌剂、抗氧化剂、酶类、香料和营养物质等活性物质以达到维持或改善食品品质的目的。该系统通过活性因子的缓慢和持续释放可以补充食品中消耗或损失的那部分活性物质, 而且可以将作用范围定位于最易发生腐败变质反应的食品表面^[5-6], 通过调控释放速率使食品表面的活性物质维持在能抑制微生物生长或氧化腐败的临界浓度^[1]。

目前, 活性包装的非控制递送系统即缓释技术在食品中运用较多, 控释技术则更多用于医药领域的给药系统以便优化治疗效果, 在食品领域中应用较少, 而国内对该技术在食品领域的报道更少, 只有少量研究报道了微胶囊的控释系统^[7-9]。控释技术不仅拥有缓释的功能, 可以实现活性物质较长时间的递送, 而且关注于释放行为^[10]及释放速率的研究, 具有对释放速率的可预

收稿日期: 2011-05-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2009C002); 农业部公益性行业(农业)科研专项(200903012); 国家“863”计划项目(2011AA100805)

作者简介: 应丽莎(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品包装材料及技术。E-mail: yls.214@163.com

* 通信作者: 张敏(1975—), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为食品包装材料及技术。E-mail: zmqx123@163.com

测性和重现性的特点^[11],能够有效避免释放的活性物质浓度过高或过低而导致食品产生异味、色变等系统感官和毒理学问题,增加了系统的有效性和持续性。由此可见,控释系统在食品活性包装中具有广泛的研究和应用前景^[3]。

1 控释系统中活性物质的释放机理

1.1 扩散受限释放

扩散受限释放指的是一种库藏系统的释放行为。在该库藏系统中,活性剂被束缚在阻隔层内,阻隔层可以是微孔、大孔或无孔。活性剂先从储藏库中溶出,通过载流体进入阻隔层,逐步扩散到达阻隔层表面,最终被转移到食品中。活性剂的释放速率取决于其在聚合物阻隔层的扩散速率,受阻隔层的厚度、面积和渗透性的影响^[3]。

1.2 溶胀诱导释放

溶解或分散在聚合物基质中的活性物质由于其扩散系数低而在基质中没有明显的扩散行为,当聚合物基质置于热力学相容介质中,聚合物溶胀部位因吸收介质中的液体即渗透液使聚合物网状系统的网孔变大,活性剂扩散系数增加,活性剂开始从基质扩散进入外部溶液,直到两相间达到热力学平衡^[3,12]。在溶胀控释系统中,薄膜与渗透剂发生交互作用后将经历一个从玻璃态向橡胶态的转变过程,处于橡胶态的聚合物链流动性增加,使活性剂能更迅速地从中扩散出去^[3]。Buonocore等^[13]报道聚乙烯醇(PVOH)基聚合物材料在干燥状态可完全包埋溶菌酶,当活性薄膜与水介质接触时,亲水性的PVOH吸水溶胀,聚合物网络系统的网目增加,继而释放溶菌酶。

1.3 生物降解诱导释放

生物降解诱导释放系统指的是包装材料中添加的活性物质随着材料降解作用的发生向介质释放。该系统存在两种不同的侵蚀机制。一种是表面或异相侵蚀。此时,聚合物降解速率大于水向聚合物内部的侵入速率,降解主要发生在聚合物外层,故只影响表层,基质内部不受影响。另外一种为体积或同质侵蚀。该聚合物降解比较缓慢,系统对水的吸收快于聚合物的降解,因此,整个系统迅速被水合,聚合物链被断开,故侵蚀作用不仅仅限于聚合物表面。一般来说含有大量活性功能组分的聚合物易于快速降解,容易发生表面侵蚀,而含有少量活性功能组分的聚合物容易发生整体侵蚀^[3]。

1.4 扩散迂回释放

当载体聚合物基质中存在大量分布的微晶等活性物质不能穿透的部分,内部掺杂的活性物质的扩散行为受到阻碍,扩散程的迂曲度增加,故扩散时间延长^[11]。

对于扩散迂回系统,目前大量研究关注于向聚合物基质掺杂纳米添加剂,使基质中形成许多纳米平板,活性分子插层进入纳米层之间能够增加滞留能力^[14],而且活性物质要经过更长的距离绕过该系统中不通透的平板层才能到达食品表面,因此系统对活性物质的释放速率减慢^[15]。

2 控释技术在食品活性包装中的应用现状

2.1 抗氧化功能

氧化反应是影响食品货架期稳定性的重要因素之一,氧化导致食品腐败味的生成、颜色和风味改变以及营养流失等产品品质劣变问题,给食品企业造成了巨大的经济损失。为保证食品在整个保质期内的抗氧化功能的持续性,往往会使用超过最适浓度的抗氧化剂添加到食品中或分布在食品表面,但起始的大剂量抗氧化剂反而可能会引起促氧化作用^[11],而且天然抗氧化剂如植物提取物大部分含浓郁的气味,在食品中添加量过大会对食品风味产生不利影响^[16]。而抗氧化剂的控释可以实现对食品表面的靶点作用,Granda-Restrepo等^[17]报道多层活性包装的生育酚递送系统有效延缓了全脂奶粉的脂类氧化。目前虽然有文献报道^[18-19]在包装材料中加入抗氧化剂制备活性包装材料,可以延缓产品氧化,如de Abreu等^[20]报道低密度聚乙烯(LDPE)添加大麦壳提取物制成的抗氧化活性包装有效增强了大青鲨鱼肉在冻藏期间的抗氧化稳定性,但是抗氧化活性包装的研究总体上比较少,尤其是控制活性物质在不同食品体系中以适宜速率释放的研究。

2.2 抗菌功能

微生物侵染不仅缩短了食品的货架期,同时增加了食品传染疾病的风险。抗菌活性包装可以通过降低微生物的繁殖速率,延长目标微生物的停滞期或钝化微生物^[21]来达到保护食品安全的目的。抗菌功能是目前控释系统研究的热点领域^[22-24],大量研究^[25-26]发现利用控释作用可以增加系统的抗菌活性。Zema等^[6]报道脱氢乙酸钠会因为辅助抗菌剂甲醛的存在导致其整体降解速率增加,生成无活性的三环化合物,丧失抗菌能力,而利用基底的缓释可以补偿与甲醛反应的那部分,故能较长时间提供有效的脱氢乙酸钠浓度。Trinetta等^[27]发现含细菌素的芽孢杆菌糖包装系统对单核细胞增生利斯特菌的抑制作用达3周以上,显示了持久的抗菌活性,而直接向食品基质添加抗菌剂可能会因为其与食品成分如脂类和蛋白质发生交叉反应从而损失了部分活性^[25,27]。Tunc等^[15]也证明利用控释系统中香芹酚的低释放速率能有效抑制香肠表面微生物的生长。

2.3 风味物质持留功能

食品的特征风味由食品基质释放的芳香化合物数量及其本质特性决定,但是芳香化合物在食品储存过程中由于蒸发、空气氧化、暴露于光照、湿气或酸性pH值等不利环境、与其他成分发生反应等造成大量损失^[28-29],导致食品风味强度下降及其特征型风味发生改变。而包装材料包埋芳香物质形成的控释系统通过保护芳香物质并缓慢释放,能有效防止食品感官和食用品质的下降。该系统能增强芳香物质的稳定性和功效,避免添加高浓度的芳香物质。而且可以控制风味物质在适当时期以特定速率释放^[30],如可以根据需要在适当的加工阶段或消费阶段(消费者口中)启动释放系统^[28]。

2.4 营养功能

在食品系统中掺杂生物活性物质如活性肽、维生素、有益菌种、抗氧化剂等是开发新型功能性食品的一种简单有效的方式,它不仅可以提供生理益处,而且减少了疾病的发生率^[31-32]。但是,添加的微量营养素或营养物由于自身的不稳定性或与其他成分的交互作用,容易使食品的物理化学稳定性、外观、质构、风味、味道和生物利用率发生改变,对食品的功能性产生不利影响^[33]。而利用可食性膜对活性物质进行包埋递送可以有效克服上述缺陷,而且还可以实现并准确控制活性成分在咀嚼和消化过程中的适时释放,使生物活性分子的活性一直得到保存直至递送到有机体的生理目标部位,使机体得到最大的吸收^[34]。如 α -生育酚经藻酸盐和蛋白水凝胶包埋,能有效减少生育酚在胃部环境的损失,使其进入目标消化系统肠道进行释放,因为大部分营养素和维生素在肠道能够得到充分吸收,故提高了生育酚的生物利用率^[35]。

3 控释技术在食品活性包装中应用的研究现状

3.1 控释包装材料的制备

制作活性薄膜最常用的工艺是热挤出^[36-37]和溶液流延或涂覆^[38],挤出工艺虽然常用于工业上包装薄膜的生产,但是挤出机内部的高温高压和高剪切率会影响聚合物基质包埋的活性剂的功能性^[39-40]。而溶液成膜虽然比较费时,但由于其操作简便的优点广泛用于目前实验室阶段控释系统的制备。一般采用的方法是在基质溶液中添加抗氧化或抗菌等活性剂,混合并同时掺杂增塑剂或交联剂等成膜辅料,然后进行浸渍或喷洒处理得到活性涂覆;或者将该混合体系置于一定温湿度条件下干燥蒸发溶剂,即可得一定厚度的薄膜。此外,挤出工艺和溶液成膜也可用于多层薄膜活性体系的制备^[41-42]。

活性系统由载体基质和活性物质组成。通常LDPE、PVOH等传统聚合物材料一般作为活性体系的基

底物质,然而随着对环保包装材料的迫切需求,目前可降解的生物基聚合物或生物聚合物材料成为了研究的热点,主要包括多糖类(淀粉、藻酸盐、果胶、角叉菜胶、壳聚糖/壳多糖)、蛋白质类(络蛋白、乳清蛋白、胶原、明胶、玉米、大豆、小麦等)、脂类(脂肪、蜡或油等)和其他聚合物类(生物衍生单体构成的聚乳酸和聚酯,微生物产生的纤维素、黄原胶、芽孢菌糖等)^[43]。同时,控释系统中天然活性剂的使用也是未来的发展趋势。而活性剂由于其自身性质不同,存在两种作用方式:对于挥发性活性剂如各种植物提取物精油,可以通过气相从包装层扩散到食品表面;对于大部分非挥发活性剂,则只能通过贴体包装系统从材料向食品接触表面迁移^[44]。

总之,活性体系的制备因基底组分及活性剂种类的多样性而呈现一定的差异,故选用工艺方法和条件时要充分考虑成膜组分的物理化学特性。在实际应用中,还要充分考虑复杂的食品成分、控释系统的应用环境及该活性体系可能存在的物理化学反应,以保证该系统的有效性。如部分活性物质尤其是植物提取物可能带有一定的颜色,掺杂入包装材料会导致不利的颜色改变^[45];而Millette等^[46]发现将乳链球菌素固定于活化藻酸盐后,其抗菌活性降低,这可能是由于细菌素和藻酸盐的二醛残基结合所致。

3.2 控释系统中活性物质释放速率的影响因素及调控方法

3.2.1 活性体系加工工艺

活性膜制备过程中使用的铸型技术^[47]、蒸发条件、流延厚度^[48]及薄膜的改性^[49]等均会对活性物质的释放速率产生影响。Mayachiew等^[50]发现壳聚糖抗氧化膜制备过程中使用的干燥方法和温度条件会改变活性物质与壳聚糖基底之间发生的链间交联程度,从而影响膜的溶胀及活性物的释放。研究发现聚合物基质的交联程度能够调节活性剂的释放动力学^[51],活性剂的扩散系数总是随着交联程度的减少而增大^[10]。

3.2.2 活性物质载体基质成分

活性系统选取的主要基底物质和加入的辅助添加剂能够对活性物质的释放速率起调控作用。研究报道纳米添加剂的掺入可使薄膜基质的迂曲度增加^[15,52],并且活性剂与纳米层发生的插层作用也促使活性物质的持留能力增强^[14];Mastromatteo等^[48]发现大量麦糠添加到玉米醇溶蛋白基薄膜中会促使所包埋的瑞香草分的释放速率增加,这可能是因为分散的瑞香草分被麦糠形成的大量微小通道所联通,故绕过了玉米醇溶蛋白阻隔基质,增加了活性物质的耗损速率。活性系统中添加的交联剂则通过活性剂与聚合物的结合程度影响活性分子的扩散,

交联剂数量增加,与活性物质的结合位点数量随之增加,更多活性剂将结合于聚合物主链^[10]。此外,起始流延溶液组分也会影响薄膜的结构属性,从而使活性剂的速率受到影响^[11]。

3.2.3 活性物质的种类

活性成分的扩散和传质行为同样受其自身性质的影响。Granda-Restrepo等^[36]发现 α -生育酚从多层复合薄膜中的释放速率低于其他抗氧化剂如丁基羟基茴香醚(BHA)和二丁基羟基甲苯(BHT)从相同薄膜的释放速率,这是因为生育酚的蒸气压较低而分子尺寸较大,故迁移速率减慢^[36]。Gemili等^[11]报道L-酪氨酸在水相的释放速率小于高度极性的L-抗坏血酸,根据相似相溶原理,相对疏水的酪氨酸在其疏水聚合物基质醋酸纤维素中的持留力较大,故在水相中释放速率减小。此外,相比抗坏血酸的四碳环结构,酪氨酸的六碳芳香环也增加了扩散阻碍。Koontz等^[11]发现环糊精包埋 α -生育酚可以获得抗氧化剂的持续释放,而环糊精包埋槲皮素则无释放能力,这是由于槲皮素在LDPE中的有限溶解度使大部分槲皮素被持留在聚合物相分离区域,因此抑制了释放。

3.2.4 活性物质释放介质

活性剂释放的程度和动力学依赖于食品的类型^[53]及系统环境^[54]。Vega-Lugo等^[55]发现异硫氰酸烯丙酯的释放在高湿度条件下被触发,这可能是由于水的增塑作用增加了聚合物基质的分子运动,从而触发活性物质的释放;钱亮亮等^[56]也报道肉桂醛的环糊精包合物对客体的释放速率随环境相对湿度的增加而增大;Mascheroni等^[57]指出聚乳酸/蜂胶活性膜在水相中的递送系统并不适用于乙醇介质,活性物质在乙醇介质中的释放动力学在几分钟内将达到平衡,这表明聚乳酸和含乙醇的流体食品可能会发生反应,乙醇向聚乳酸的迁移导致聚乳酸结构发生改变。此外,有研究报道表明解吸介质的离子强度^[58]、水分活度^[59]和系统的温湿度^[60]也会影响薄膜中活性物质的释放速率。

3.3 控释系统的动力学研究

对释放速率的研究是控释技术与缓释技术相区别的一个主要因素。为了评估控释系统的性能并实现释放速率的可预测性,往往需要设计一个控释模型进行动力学研究。Mastromatteo等^[3]很好地综述了控释系统中不同释放机制的数学建模,但是目前在控释模型的设计或评价过程中,释放介质一般选用水或水溶液,或者是脂肪食品模拟物如植物油^[11,42]和乙醇^[61]等,另外琼脂^[62]也是广泛采用的抗菌评价媒介,但是食品基质实际的扩散过程往往比模型系统复杂得多,模型的理想化和简单化可能无法完全应对复杂的食品体系。如Fajardo等^[59]发现壳聚糖-纳他霉素涂层与奶酪直接接触时,纳他霉素

的扩散系数低于其在模拟液体介质磷酸盐缓冲液中的扩散系数。因此,加强控释系统在具体食品基质中的动力学研究显得很有必要。

4 结 语

由于控释系统的功效由活性物质的扩散和传质行为决定,而活性物质的释放速率又存在众多影响因素,故控释系统释放模型的建立及释放动力学研究将是以后重要的研究方向。然而目前的研究还存在一定的局限性,理想情况下建立的模型无法满足错综复杂的食品系统,而且食品与活性材料之间可能存在的相互作用及食品包装后的工艺处理如高压、微波加热、辐照等均会对控释系统的效能产生一定的影响。

此外,可降解生物或生物基材料掺杂天然活性剂是未来控释系统的发展趋势,而天然可降解系统的复杂性和不稳定性比合成系统要大的多,在控释系统的制备过程中,要注意活性物质活性的保持并减少损失率,而缩短活性材料与传统材料在阻隔性能、热封性能、拉伸强度、透明度、颜色等物理属性方面的差距将有助于扩大控释系统在食品活性包装中的应用。

参考文献:

- [1] GEMILI S, YEMENICIOGLU A, ALTINKAYA S A. Development of antioxidant food packaging materials with controlled release properties [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(3): 325-332.
- [2] CHOLLET E, SWESI Y, DEGRAEVE P, et al. Monitoring nisin desorption from a multi-layer polyethylene-based film coated with nisin loaded HPMC film and diffusion in agarose gel by an immunoassay (ELISA) method and a numerical modeling [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(2): 208-214.
- [3] MASTROMATTEO M, MASTROMATTEO M, CONTE A, et al. Advances in controlled release devices for food packaging applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(12): 591-598.
- [4] LOPEZ-de-DICASTILLO C, GALLUR M, CATALA R, et al. Immobilization of beta-cyclodextrin in ethylene-vinyl alcohol copolymer for active food packaging applications [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 353(1/2): 184-191.
- [5] ALMENAR E, CATALA R, HERNANDEZ-MUNOZ P, et al. Optimization of an active package for wild strawberries based on the release of 2-nonanone [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 587-593.
- [6] ZEMA L, SANGALLI M E, MORONI A, et al. Active packaging for topical cosmetic/drug products: a hot-melt extruded preservative delivery device [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2010, 75(2): 291-296.
- [7] 王晓园, 杨晓泉. 转谷氨酰胺酶诱导复合蛋白冷致凝胶性能及对茶碱的控释研究 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(3): 95-98.
- [8] 张峻, 吉伟之, 陈晓云, 等. 壳聚糖-海藻酸钠微胶囊对葡萄糖酚控制释放的研究 [J]. 食品科学, 2004, 25(5): 102-104.
- [9] 黄国平, 骈晓飞. 高效缓释甜味剂的研制 [J]. 食品工业科技, 2006, 27(1): 163-165; 168.
- [10] BUONOCORE G G, del NOBILE M A, PANIZZA A, et al. A general approach to describe the antimicrobial agent release from highly swellable

- films intended for food packaging applications[J]. Journal of Controlled Release, 2003, 90(1): 97-107.
- [11] KOONTZ J L, MOFFITT R D, MARCY J E, et al. Controlled release of -tocopherol, quercetin, and their cyclodextrin inclusion complexes from linear low-density polyethylene (LLDPE) films into a coconut oil model food system[J]. Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2010, 27(11): 1598-1607.
- [12] del NOBILE M A, CONTE A, INCORONATO A L, et al. Antimicrobial efficacy and release kinetics of thymol from zein films[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(1): 57-63.
- [13] BUONOCORE G G, CONTE A, CORBO M R, et al. Mono- and multilayer active films containing lysozyme as antimicrobial agent[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2005, 6(4): 459-464.
- [14] MASCHERONI E, CHALIER P, GONTARD N, et al. Designing of a wheat gluten/montmorillonite based system as carvacrol carrier: rheological and structural properties[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4): 406-413.
- [15] TUNC S, DUMAN O. Preparation of active antimicrobial methyl cellulose/carvacrol/montmorillonite nanocomposite films and investigation of carvacrol release[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(2): 465-472.
- [16] CAMO J, LORES A, DJENANE D, et al. Display life of beef packaged with an antioxidant active film as a function of the concentration of oregano extract[J]. Meat Science, 2011, 88(1): 174-178.
- [17] GRANDA-RESTREPO D M, SOTO-VALDEZ H, PERALTA E, et al. Migration of alpha-tocopherol from an active multilayer film into whole milk powder[J]. Food Research International, 2009, 42(10): 1396-1402.
- [18] de ABREU D A P, LOSADA P P, MAROTO J, et al. Lipid damage during frozen storage of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) in active packaging film containing antioxidants[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 315-320.
- [19] NERIN C, TOVAR L, DJENANE D, et al. Stabilization of beef meat by a new active packaging containing natural antioxidants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(20): 7840-7846.
- [20] de ABREU D A P, LOSADA P P, MAROTO J, et al. Natural antioxidant active packaging film and its effect on lipid damage in frozen blue shark (*Prionace glauca*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(1): 50-55.
- [21] MOREIRA M D, PEREDA M, MARCOVICH N E, et al. Antimicrobial effectiveness of bioactive packaging materials from edible chitosan and casein polymers: assessment on carrot, cheese, and salami[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): M54-M63.
- [22] PIRES A C D, SOARES N D F, de ANDRADE N J, et al. Development and evaluation of active packaging for sliced Mozzarella preservation[J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(7): 375-383.
- [23] HANUSOVA K, KLAUDISOVA K, MILATOVA E, et al. Release of nisin from polyvinylidene chloride lacquer coated on a polyethylene film[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2010, 49(1): 21-29.
- [24] MECITOGLU C, YEMENICIOGLU A, ARSLANOGLU A, et al. Incorporation of partially purified hen egg white lysozyme into zein films for antimicrobial food packaging[J]. Food Research International, 2006, 39(1): 12-21.
- [25] MALHEIROS P D, DAROIT D J, BRANDELLI A. Food applications of liposome-encapsulated antimicrobial peptides[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(6): 284-292.
- [26] YANG Fenglian, LI Xuegang, ZHU Fen, et al. Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(21): 10156-10162.
- [27] TRINETTA V, FLOROS J D, CUTTER C N. Sakacin A-containing pullulan film: an active packaging system to control epidemic clones of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods[J]. Journal of Food Safety, 2010, 30(2): 366-381.
- [28] MONEDERO F M, HAMBLETON A, TALENS P, et al. Study of the retention and release of *n*-hexanal incorporated into soy protein isolate-lipid composite films[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 133-138.
- [29] FABRA M J, HAMBLETON A, TALENS P, et al. Influence of interactions on water and aroma permeabilities of iota-carrageenan-oleic acid-beeswax films used for flavour encapsulation[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 76(2): 325-332.
- [30] MARCUZZO E, SENSIDANI A, DEBEAUFORT F, et al. Encapsulation of aroma compounds in biopolymeric emulsion based edible films to control flavour release[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(3): 984-988.
- [31] CHEN L Y, REMONDETTO G E, SUBIRADE M. Food protein-based materials as nutraceutical delivery systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(5): 272-283.
- [32] ELLIOTT R, ONG T J. Science, medicine, and the future-nutritional genomics[J]. British Medical Journal, 2002, 324: 1438-1442.
- [33] VELIKOV K P, PELAN E. Colloidal delivery systems for micronutrients and nutraceuticals[J]. Soft Matter, 2008, 4(10): 1964-1980.
- [34] WEISS J, DECKER E A, MCCLEMENTS D J, et al. Solid lipid nanoparticles as delivery systems for bioactive food components[J]. Food Biophysics, 2008, 3(2): 146-154.
- [35] SOMCHUE W, SERMSRI W, SHIOWATANA J, et al. Encapsulation of alpha-tocopherol in protein-based delivery particles[J]. Food Research International, 2009, 42(8): 909-914.
- [36] GRANDA-RESTREPO D, PERALTA E, TRONCOSO-ROJAS R, et al. Release of antioxidants from co-extruded active packaging developed for whole milk powder[J]. International Dairy Journal, 2009, 19(8): 481-488.
- [37] PELISSARI F M, GROSSMANN M V E, YAMASHITA F, et al. Antimicrobial, mechanical, and barrier properties of cassava starch-chitosan films incorporated with oregano essential oil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(16): 7499-7504.
- [38] YUAN Bing, ZHU Tao, ZHANG Zexin, et al. Self-assembly of multilayered functional films based on graphene oxide sheets for controlled release[J]. Journal of Materials Chemistry, 2011, 21(10): 3471-3476.
- [39] MENSITIERI G, DI MAIO E, BUONOCORE G G, et al. Processing and shelf life issues of selected food packaging materials and structures from renewable resources[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(2-3): 72-80.
- [40] NAM S, SCANLON M G, HAN J H, et al. Extrusion of pea starch containing lysozyme and determination of antimicrobial activity[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(9): E477-E484.
- [41] GUIGA W, SWESI Y, GALLAND S, et al. Innovative multilayer antimicrobial films made with Nisaplin (R) or nisin and cellulosic ethers: Physico-chemical characterization, bioactivity and nisin desorption kinetics[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(2): 352-360.
- [42] PELTZER M, WAGNER J, JIMENEZ A. Migration study of carvacrol as a natural antioxidant in high-density polyethylene for active packaging [J]. Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2009, 26(6): 938-946.

- [43] CUTTER C N. Opportunities for bio-based packaging technologies to improve the quality and safety of fresh and further processed muscle foods [J]. *Meat Science*, 2006, 74(1): 131-142.
- [44] GEMILI S, YEMENICIOGLU A, ALTINKAYA S A. Development of cellulose acetate based antimicrobial food packaging materials for controlled release of lysozyme[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(4): 453-462.
- [45] WU J G, WANG P J, CHEN S C. Antioxidant and antimicrobial effectiveness of catechin-impregnated PVA-starch film on red meat[J]. *Journal of Food Quality*, 2010, 33(6): 780-801.
- [46] MILLETTE M, le TIEN C, SMORAGIEWICZ W, et al. Inhibition of *Staphylococcus aureus* on beef by nisin-containing modified alginate films and beads[J]. *Food Control*, 2007, 18(7): 878-884.
- [47] FLORES S, CONTE A, CAMPOS C, et al. Mass transport properties of tapioca-based active edible films[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(3): 580-586.
- [48] MASTROMATTEO M, BARBUZZI G, CONTE A, et al. Controlled release of thymol from zein based film[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(2): 222-227.
- [49] de SOUZA P M, FERNANDEZ A, LOPEZ-CARBALLO G, et al. Modified sodium caseinate films as releasing carriers of lysozyme[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(4): 300-306.
- [50] MAYACHIEW P, DEVAHASTIN S. Effects of drying methods and conditions on release characteristics of edible chitosan films enriched with Indian gooseberry extract[J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(3): 594-601.
- [51] BUONOCORE G G, SINIGAGLIA M, CORBO M R, et al. Controlled release of antimicrobial compounds from highly swellable polymers[J]. *Journal of Food Protection*, 2004, 67(6): 1190-1194.
- [52] SANCHEZ-GARCIA M D, LOPEZ-RUBIO A, LAGARON J M. Natural micro and nanobiocomposites with enhanced barrier properties and novel functionalities for food biopackaging applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(11): 528-536.
- [53] LÓPEZ-de-DICASTILLO C, ALONSO J M, CATALÁ R, et al. Improving the antioxidant protection of packaged food by incorporating natural flavonoids into ethylene-vinyl alcohol copolymer (EVOH) films[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(20): 10958-10964.
- [54] AYALA-ZAVALA J F, del-TORO-SANCHEZ L, ALVAREZ-PARRILLA E, et al. High relative humidity in-package of fresh-cut fruits and vegetables: advantage or disadvantage considering microbiological problems and antimicrobial delivering systems?[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(4): R41-R47.
- [55] VEGA-LUGO A C, LIM L T. Controlled release of allyl isothiocyanate using soy protein and poly(lactic acid) electrospun fibers[J]. *Food Research International*, 2009, 42(8): 933-940.
- [56] 钱亮亮, 金征宇, 邓力. 密封控温法制备控释材料肉桂醛- β -环糊精包合物[J]. *食品与发酵工业*, 2007, 33(12): 13-16.
- [57] MASCHERONI E, GUILLARD V, NALIN F, et al. Diffusivity of propolis compounds in polylactic acid polymer for the development of anti-microbial packaging films[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(3): 294-301.
- [58] GUIGA W, GALLAND S, PEYROL E, et al. Antimicrobial plastic film: physico-chemical characterization and nisin desorption modeling [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(2): 203-207.
- [59] FAJARDO P, MARTINS J T, FUCINOS C, et al. Evaluation of a chitosan-based edible film as carrier of natamycin to improve the storability of Saloio cheese[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 101(4): 349-356.
- [60] CHALIER P, BEN ARFA A, GUILLARD V, et al. Moisture and temperature triggered release of a volatile active agent from soy protein coated paper: effect of glass transition phenomena on carvacrol diffusion coefficient[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(2): 658-665.
- [61] SIRO I, FENYVESI E, SZENTE L, et al. Release of alpha-tocopherol from antioxidative low-density polyethylene film into fatty food simulant: influence of complexation in beta-cyclodextrin[J]. *Food Additives and Contaminants Part A: Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment*, 2006, 23(8): 845-853.
- [62] SAYANJALI S, GHANBARZADEH B, GHIASSIFAR S. Evaluation of antimicrobial and physical properties of edible film based on carboxymethyl cellulose containing potassium sorbate on some mycotoxigenic *Aspergillus* species in fresh pistachios[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 1133-1138.