

综述

国内外活性食品接触材料的研究进展

于松,邹连蓬,戴承兵,富需恒,汪国权,熊丽蓓
(化学品毒性检定所,上海市疾病预防控制中心,上海 200336)

摘要:随着消费者对食品品质和安全需求的日益增高,能够提高食品新鲜度和延长保质期的活性食品接触材料逐渐被应用。本文对目前活性食品接触材料中常见活性物质的种类、功能、作用机制、应用方式等进行了汇总与分析,论述了国内外对活性食品接触材料监管的专门法规和标准,对存在的问题及发展方向进行了总结和展望,以期成为活性食品接触材料的安全使用、商业化生产和监管法规的制定提供科学基础。

关键词:活性食品接触材料;抗氧化物质;抗菌物质;应用方式;风险管理

中图分类号:R155 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-8456(2022)06-1375-10

DOI:10.13590/j.cjfh.2022.06.041

Research progress on active food contact materials at home and abroad

YU Song, ZOU Lianpeng, DAI Chengbing, FU Xuheng, WANG Guoquan, XIONG Libei
(Division of Chemical Toxicity and Safety Assessment, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract: Because of an increasing demand on food quality and safety from consumers, active food contact materials that can improve food freshness and extend shelf life are emerging. This paper summarizes and analyzes the types, functions, mechanism and application methods of active substances commonly used in active food contact materials at present. The regulations and standards of active food contact materials at home and abroad are discussed. The existing problems and development directions are summarized to provide scientific basis for promoting safely use, commercial produce and regulation formulation.

Key words: Active food contact material; antioxidant; antibacterial substance; application method; risk management

随着消费者对食品品质追求的提升和食品安全法规的不断完善,食品包装研究在科学和工业领域都呈指数级增长^[1-2]。应用食品包装是保持在生产、储存和销售等环节食品质量的重要措施^[3]。随着人们生活水平的提高和健康意识的不断增强,对干净、高质量、新鲜、最少加工和即食食品的需求逐渐增加,导致这些食品需要具备更高的新鲜度和更长的保质期,以保证良好的品质^[4-5]。食品腐败变质的主要原因是食品中含有丰富的营养物质和水分,容易造成微生物在其表面大量繁殖,造成食品腐烂变质^[6]。另一方面,食物中物质成分的氧化,也会导致食品的腐烂^[7]。目前,延长食品保质期的方式主要是向其中添加大量防腐剂,然而,防腐剂的添加会造成

食品口味、颜色和营养物质变化等潜在的食品安全问题,同时,对于蔬菜、水果等生鲜食品无法应用向其中添加防腐剂的方式延长保质期。如何在保持食品新鲜度和延长保质期的同时,降低化学添加剂的直接使用,最大程度地保证食品的安全性,是食品行业迫切需要解决的问题^[8]。在此背景下,活性食品接触材料组成的活性食品包装应运而生。但目前活性食品包装大多仍处于研究阶段,商业化较少。

活性食品包装是指在包装材料或包装内部空间中有意包含活性成分以提高包装系统性能的包装,这些成分能够从包装的活性食品接触材料中释放或吸收其他物质,以达到延长包装食品的保质期、维持或改善包装食品状况的目的^[9]。主要的食品接触材料用活性物质包括水分吸收剂、氧气清除剂、乙烯吸收剂、抗氧化剂和抗菌剂等,其中一些活性食品接触材料已经被商业化应用(表1)^[5,10-14]。2019年,美国市场调研公司 Grand View Research Company 在其市场调研报告中指出,2024年美国活

收稿日期:2022-03-06

作者简介:于松 男 主管技师 研究方向为食品接触材料污染物检测与风险评估 E-mail:yusong@scdc.sh.cn

通信作者:熊丽蓓 女 主任技师 研究方向为食品接触材料分析与研究 E-mail:xionglipei@scdc.sh.cn

表1 一些商业化的活性食品接触材料产品

Table 1 Commercialized active food contact materials products

功能	商品名称	应用类型	生产国家
吸收水分	Nor [®] Absorbit	薄膜	德国
	Fresh-R-Pax [®]	吸水盘	美国
	MoistCatch	吸水垫	日本
	MeatGuard	吸水垫	美国
吸收氧气	OMAC [®]	耐高温薄膜	日本
	Cryovac [®] OS2000	薄膜	美国
	OxyCatch [®]	独立小袋	日本
	Ageless [®]	独立小袋	美国
	Freshcare [®]	独立小袋	日本
释放CO ₂	CO ₂ [®] Fresh Pads	CO ₂ 释放垫	美国
	UltraZap [®] Xtenda Pak pads	CO ₂ 释放垫	美国
释放SO ₂	Uvasy [™]	保鲜垫(葡萄)	南非
	Microgarde [™]	独立小袋、薄膜	美国
抗菌活性	Bioka	独立小袋	芬兰
	Wasapower [™]	PET薄膜涂层、片剂	日本
	Zeomic [™]	薄膜	日本
	Microgarde [™]	独立小袋、薄膜、包装	美国
	WasaOuro	层压板	日本
	Uvasy [™]	层压板和垫	南非
	Bactiblock [®]	色母粒	西班牙

性包装市场价值将达到60亿美元。如今,大量的食品工业研究聚焦在活性食品接触材料的开发和改良,这项新技术正在逐渐应用于食品行业^[15]。本文综述了活性食品接触材料种类和功能、研究进展、应用现状及法规和标准,为今后活性食品接触材料广泛应用及监管提供科学基础。

1 常见活性食品接触材料的种类

1.1 吸收型食品接触材料

1.1.1 水分吸收型

水分通常是食品工业中最令人不安的因素之一,它会在所有阶段产生有害和破坏性的影响,包括储存、运输和售卖阶段^[16-17]。食品包装内含水量过高时,会导致霉菌和细菌加速生长,进而导致食品风味发生改变,甚至腐败变质。研究发现,在包装内使用吸湿剂来控制包装中水分的存在是一个较好的解决方案^[17-18]。吸湿剂通常被制造成垫、小袋和薄膜等形式,并通过吸水材料的物理吸附或化学反应来吸收水分。常用的吸水剂包括无机材料和有机材料两类(表2)^[19]。

目前,无机吸湿剂被广泛用于食品工业,它们主要通过物理(如硅胶)和化学(如氧化钙)吸附作用,降低包装内部空间的相对湿度或收集容器底部渗出的液体。被制成小袋放在食品包装内是无机吸湿剂主要应用方式。国内外一些企业已经开发出包裹硅胶、碳酸钾和膨润土等矿物材料的小袋干燥剂,并已广泛应用^[20-21]。但在生产环节需注意小袋包装材料的物理机械性能和其中的物质组成,以防

表2 常见的吸收型活性食品接触材料的功能及活性物质种类

Table 2 Functions and types of active substances of common absorbing active food contact materials

功能	类型	活性物质名称
水分吸收	无机吸湿剂	氯化钾、碳酸钾、氯化钙、氧化钙、硅胶和膨润土
	有机吸湿剂	山梨糖醇、果糖、纤维素、甘油和淀粉
氧气吸收	无机金属	铁、铂和钯
	天然物质	生育酚、抗坏血酸、油酸和酶
乙烯吸收	天然黏土	沸石、埃洛石纳米管、日本大谷石、方石英、膨润土和陶瓷
	可再生吸附剂	丙二醇、己二醇、角鲨烯、苯甲基硅氧烷、聚乙烯和聚苯乙烯
	催化氧化剂	高锰酸钾、重铬酸钾、五氧化二碘硝酸银和钡
	其他	活性炭、结晶铝硅酸盐、硅藻土、硅胶和氧化铝

止小袋内的吸水剂在食品运输和销售过程中破裂或泄漏及包装自身材料中化学物质向食物的迁移,而引起包装食品的感官特性改变和安全性问题^[21-23]。

基于有机材料的吸湿剂具有以托盘和薄膜形式应用于食品包装的良好潜力。将山梨糖醇和果糖等天然吸湿剂包埋在聚合物基质中制作成控湿薄膜是未来研究的重点^[24]。利用热熔挤出方式将山梨糖醇、甘油等掺入聚合物基质中,制备出具有调节包装食品湿度能力的包装材料^[20]。这些包装材料基于此类物质在聚合物中的均匀分散,能够降低或稳定包装内的相对湿度,达到延长包装食品保质期的效果^[25]。同时,研究人员发现了纤维素作为一种有机聚合物在食品包装内也具有吸湿效果^[26],其衍生物羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC)因其优异的成膜性能在活性食品包装领域受到关注。CMC是一种极性高分子化合物,其吸湿能力取决于相对湿度和某些极性基团的存在,极性基团数量越高,吸湿能力越强。最近已被越来越多的应用在活性食品包装领域^[25]。然而,吸水材料从薄膜迁移到包装内食品中可能会污染食品,并增加安全风险,并且与无机吸收剂相比,有机吸湿剂的吸湿能力较低,成本较高。今后需要开展更多的研究来提高有机吸湿剂的吸收效率、安全性和商业化可能性,并延长有机基吸湿剂的稳定性。

1.1.2 氧气吸收型

食品包装中氧气的存在会促进霉菌、需氧细菌等微生物的生长,从而导致食品中脂肪和维生素的氧化,加速食品腐败^[7]。它对食品的影响主要表现为风味的不良改变、颜色变化和营养流失^[27-28]。尽管真空包装和气调包装(Modified atmosphere packaging, MAP)可以将包装内的氧气含量降低0.50%~2%(V/V),但该水平的氧气仍具有破坏性^[29]。为了解决这

个问题,需要加强食品包装清除氧气的的能力,如应用吸氧剂,从而更大程度地防止食品氧化腐败,达到延长保质期的目的。吸氧材料主要包括无机金属和天然物质等(表 2)^[30]。YILDIRIM 等^[28]最近开发了一种基于钨催化系统的除氧膜,能够将顶部空间中的残留氧减少到 0.01%(V/V)以下。较少使用的不饱和烃吸氧剂适合在烘干食品包装内使用,但它会导致包括酮和醛等副产物的产生,这些副产物可能对食品的感官质量产生不良影响,残留在食品中的副产物还可能对人体健康造成危害。虽然生育酚、抗坏血酸和酶清除系统安全性较好,但是与基于纳米金属的系统相比,成本较高。基于酶的清除剂通常会产生过氧化氢,需要使用过氧化氢酶将其转化为水。同时,它们还具有清除效率缓慢、高温失活等缺点。吸氧剂多数以独立包装的形式放置在食品包装中使用,也有少量被涂布在食品包装表面或掺入聚合物中制成吸氧膜^[12,30-31]。目前,随着市场的需要和研究的深入,针对不同类型的食品已经有一些吸氧剂被商业化。

1.1.3 乙烯吸收型

植物激素乙烯能够促进水果和蔬菜的成熟和衰老,严重缩短产品的保质期和货架期。为了降低包装中的乙烯气体并延长产品的保质期,科研人员开发了乙烯清除剂来吸收新鲜农产品产生的乙烯。基于高锰酸钾(KMnO_4)的乙烯清除系统是最常用的一种,它通过氧化过程破坏乙烯的双键结构,达到清除乙烯的目的^[32]。黏土、蛭石和活性炭等具有高表面积的多孔惰性材料也常被用于吸收乙烯(表 2)^[25,27,33]。乙烯清除剂多以独立小袋的形式应用,最近,对构建用于包装新鲜产品的塑料薄膜的新型乙烯清除材料的需求逐渐增加^[27]。随着乙烯清除材料的广泛应用,其存在的问题也逐渐被发现,包括乙烯清除材料向食品的迁移、独立包装的损坏导致物质泄漏等食品安全问题、消费者的接受程度以及生产成本较高等^[25,27]。未来,需要解决乙烯清除包装材料领域的上述担忧和问题,以在不影响食品保质期延长的情况下实现更低成本和更高安全的包装系统。

1.2 气体释放型食品接触材料

1.2.1 乙醇释放型

乙醇释放材料是将乙醇蒸汽释放到食品包装的内部空间,以抑制酵母、细菌和霉菌的生长的一种抗菌材料,可以减少水果和蔬菜在处理、储存和销售过程中的腐败变质,并延长其保质期^[34-35]。一些商业化的乙醇释放材料是通过将乙醇直接吸附在二氧化硅吸附剂上,之后将二氧化硅置于食品包装

内,逐步释放出乙醇。在这类材料中,乙醇通常以液体形式使用,挥发率较高且挥发不受控制,可能影响食品风味和增加食品安全风险^[35-37]。研究人员开发了一种控释性乙醇释放材料,以克服传统乙醇释放材料的缺点。将乙醇与不同浓度的硬脂酸钠($\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{NaO}_2$)混合,加热至 70 °C,得到半透明的乙醇凝胶产品,随后加入硅藻土以增强凝胶的机械强度和适用性。该凝胶中乙醇的释放速率能够由硬脂酸钠的浓度控制,并且对杨梅的腐败具有良好的抑制效果^[35]。

1.2.2 二氧化硫释放型

相关研究表明,在包装内添加二氧化硫有助于防止西红柿、卷心菜等农产品在储存期间腐败变质。这是因为二氧化硫等亚硫酸盐类物质能够通过抑制加工和储存过程中的酶促和非酶促褐变,对抗氧化、微生物发酵等带来的腐败。焦亚硫酸氢盐的水解或亚硫酸钙与水分的反应是包装内二氧化硫的主要来源^[31]。但是,食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)将亚硫酸盐归类为主要过敏原之一,严格规定了食品中二氧化硫的掺入剂量,其浓度不允许超过 10 mg/L,同时,应在产品标签上标明二氧化硫的存在^[38]。考虑到亚硫酸盐对人类健康的影响,如皮炎、荨麻疹、腹泻或过敏反应等,关于该材料用于保存和延长食品货架期的研究和应用较少。

1.2.3 二氧化碳释放型

二氧化碳对保持食品的初始新鲜度具有积极影响,并能够抑制与腐败相关的气味的形成。二氧化碳能够通过改变包装环境中的 pH 值、细菌细胞膜和酶活性的改变等机制延缓微生物进入对数生长阶段而发挥抗菌特性^[39-40]。已被广泛应用于食品工业以延长保质期和保持食品质量。特别对于保持新鲜肉类、鱼类和水果的新鲜度和质量,应用高浓度的二氧化碳是首选方式^[31,39]。碳酸氢钠和柠檬酸是二氧化碳释放系统中的常用的两种活性材料^[21,31]。HANSEN 等^[40]将添加了 0.24 g 柠檬酸和 0.30 g 碳酸氢钠的液体吸收垫制备出的二氧化碳释放系统放置在 MA 包装中,发现与单独应用 MA 包装相比,使用该系统后,可更好地延长鲑鱼的保质期,保留其感官特性。

1.3 抗氧化薄膜

抑制食品氧化反应的发生除了应用吸氧材料清除氧气之外,还可以通过清除超氧化物、羟基自由基等活性氧物质的途径实现^[41-42]。大量研究发现,可以通过还原反应清除超氧自由基等活性氧物质、产生氢原子中断氧化链式反应、破坏或削弱氧化酶

的活性、封闭金属离子等方式阻断或抑制氧化反应的发生,进而实现延长食品新鲜度和保质期的目的^[42-43]。具有这些功能的物质被统称为抗氧化剂,它能够通过被涂抹在包装材料表面和制备成抗氧化薄膜等方式应用^[44-45]。

丁基羟基茴香醚(Butylated hydroxyanisole, BHA)、叔丁基对苯二酚(Tertiary butylhydroquinone, TBHQ)、丁基羟基甲苯(Butylated hydroxytoluene, BHT)是目前常用的合成抗氧化剂(表3),已被食品行业广泛应用^[36,46],但一直存在着敏感的安全问题。一些研究表明,长期或过量食用TBHQ,能够导致DNA损伤,可能造成动物发生基因突变。美国卫生与公众服务部的报告指出,BHA和BHT具有致癌性^[31]。由于合成物质可能带来的健康危害,如今的消费者更青睐不含任何合成添加剂的食品。因此,采取措施代替人工合成抗氧化剂十分必要^[47]。

由于天然抗氧化剂安全性较好,能够被生物降解,被认为是代替人工合成抗氧化剂的最佳物质^[48-49]。

常用的天然抗氧化剂包括 α -生育酚、香芹酚、植物提取物等(表3)^[50-53]。目前,研究人员专注于将天然抗氧化剂加入到用于食品包装的聚合物薄膜中,制备出具有天然活性物质的抗氧化薄膜^[54]。ZHONG等^[55]将原儿茶酸掺入明胶中制备出一种抗氧化薄膜,该薄膜不仅具有清除DPPH自由基的抗氧化能力,还改善了明胶薄膜的延展性和阻隔性等物理特性。然而,在目前的研究中发现,这些天然抗氧化剂存在抗氧化能力低、热稳定性低、挥发性高等问题,增加了制造抗氧化包装系统的难度。同时,一些天然物质具有特殊香味,会导致包装食品气味的改变,也限制了其在许多食品中的应用,未来需要进一步研究以克服这些挑战。并且,天然活性物质除主要有效成分外,还可能含有其他物质,其活性功能成分也容易与包装中其他成分结合,转化成为新的物质,增加成分的复杂性;此外,天然活性物质大多稳定性较低,在常规迁移测试条件下容易分解或失活,这些特殊性质也会增加其检测分析的难度^[56]。

表3 常见的抗氧化和抗菌活性食品接触材料用活性物质种类

Table 3 Common types of active substances used in food contact materials with antioxidant and antibacterial activity

功能	类型	活性物质名称
抗氧化活性	合成抗氧化剂	2,6-二叔丁基对甲酚、没食子酸丙酯、丁基羟基茴香醚、叔丁基对苯二酚、二氧化钛、丁基羟基苯甲醚、丁基羟基甲苯
	天然抗氧化剂	α -生育酚、香芹酚、麝香草酚、维生素C、肉桂酸、绿茶提取物、可可粉提取物、原花青素、壳多糖、绿茶多酚、迷迭香、羟基肉桂酸、姜黄
抗菌活性	无机抗菌剂	银、锌、钛等金属离子及金属氧化物、二氧化氯、异硫氰酸烯丙酯
	有机抗菌剂	有机金属、季铵盐类、双胍类、醇类、酚类物质
	天然抗菌剂	孟宗竹、薄荷、山葵、蓖麻油、丁香精油、葡萄籽精油、九里香、薄荷、三奈、黄皮、五味子、益智果实挥发油、八角茴香挥发油、紫苏叶、肉豆蔻
	生物活性抗菌剂	溶菌酶、细菌素、壳聚糖

抗氧化薄膜按照作用方式,主要分为固化型和释放型。固化型是指抗氧化物质只能停留在薄膜表面,从而只能抑制与其接触食品表面的氧化腐败。释放型则是薄膜中的抗氧化物质能够扩散到食品包装内部空间,能够充分与食品表面接触,主动发挥抗氧化功能且作用范围广,具有良好的应用前景^[57]。

1.4 抗菌薄膜

应用抗菌剂在食品接触材料中将有助于抑制食品中腐败微生物的生长,使得食品保质期和新鲜度得以延长。此外,还可减少防腐剂的使用,增加食品的安全性^[58-59]。研究表明,相比于直接向食品中加入抗菌剂,在包装材料中添加抗菌剂具有更好的抗菌效果。因为直接向食品中添加的抗菌剂在食品加工过程中会发生活性损失,降低功效^[60-61]。

抗菌剂主要包括有机物质、无机物质、天然提取物和生物活性物质(表3)^[12,59,61-62]。由于无机抗菌剂比有机抗菌剂具有更优异的抗菌性能,因此,

目前相关研究较多,特别是金属纳米颗粒,如纳米银、纳米TiO₂和纳米ZnO等^[63-65]。随着环境保护和资源可持续发展的需要,越来越多的研究聚焦在将活性成分与生物聚合物材料结合,形成既具有特殊功能,又能够生物降解的环境友好型食品接触材料。ZHAO等^[65]基于纳米银颗粒和壳聚糖制备了一种抗菌材料,其结果表明,该材料能够显著抑制葡萄储存期间的霉菌总数,降低腐败的发生率,延长保质期(20℃条件下)。ALIZADEH-SANI等^[66]采用铸造方法研制了一种含有二氧化钛纳米颗粒(1% TiO₂)的生物聚合物包装薄膜,该薄膜能够显著降低冷藏羊肉在储存过程中的微生物生长、脂质氧化和脂肪分解,从而使保质期从大约6d增加到15d,未来它可应用于肉制品的包装。并且,在新型冠状病毒流行背景下,科研人员也发现了二氧化钛纳米颗粒能够有效地杀灭新型冠状病毒,未来可应用于冷链食物包装以降低病毒通过该途径的传播^[67]。郭志荣^[68]采用水热及超声辅助剥离的方法制备了纳米锰酸

铜抗菌剂,其结果表明,该抗菌剂可通过产生羟基自由基导致氧化应激,进而破坏细胞膜,杀灭病菌,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的杀灭效果,可作为抗菌材料的功效成分。随着毒理学的发展,纳米颗粒的毒性逐渐被发现,同时,由于纳米材料粒径较小,容易迁移到食物中,存在一定的食品安全隐患^[23,64,69-70]。黄皓等^[71]探究了纳米氧化锌 LDPE 抗菌薄膜中锌粒子在四种食品模拟液中的迁移规律,其结果表明,纳米银的迁移在不同介质中迁移量与温度成正比。相同条件下,在不同食品模拟液中迁移量的大小顺序为 30 g/L 乙酸>蒸馏水>95% 乙醇>10% 乙醇;还发现锌粒子的迁移范围为 0.52~14.17 mg/kg,有可能超过欧盟标准(EU) No. 10/2011 所规定的限量值 5 mg/kg。因此,应用该薄膜包装食品可能存在一定的安全隐患。同时,欧洲化学品管理局(European Chemicals Agency, ECHA)在 2021 年 3 月发表了一份新闻声明,称其生物杀灭剂产品委员会(Biocidal Products Committee, BPC)不支持批准银锌沸石(CAS 130328-20-0)、银沸石(CAS 130328-18-6)、银铜沸石(CAS 130328-19-7)以及用于食品接触应用的磷酸氢锆银钠(CAS 154339-84-1)在食品和饲料领域的应用^[72]。

许多研究发现,从茶树、茴香等植物中提取的天然成分能够抑制微生物的生长,这说明其具有应用于抗菌包装材料中良好的潜力^[73]。LENCOVA 等^[62]比较了七种适用于活性食品包装的天然添加剂(乳酸钙、柠檬酸、姜黄素、异抗坏血酸、大蒜提取物、啤酒花提取物、乳链菌肽)对单核细胞增生李斯特菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抗菌和抗生物膜作用。其研究发现所有受试物质均具有显著的抗菌作用($P \leq 0.05$);柠檬酸(MIC 和 MICBF 0.25~0.50 wt%)、大蒜提取物(MIC 和 MICBF 2.00~4.00 wt%)和异抗坏血酸(MIC 3.00~5.00 wt%;MICBF 2.00~5.00 wt%)被评估为最有效抗菌活性物质。此外,大蒜提取物和其他物质的混合物比单独应用具有更高的细菌抑制作用,这说明两种活性成分的混合策略可以更大程度地延长食品的保质期。Ma 等^[74]通过将自组装的小檗碱-肉桂酸颗粒掺入薄膜基质中,成功制备了可生物降解的抗菌的包装薄膜。该包装具有良好的动力学性能和生物相容性。此外,该薄膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌都表现出很强的抗菌能力。最后,包装试验进一步表明了该薄膜能够显著的抑制所包裹的鸡肉样品中微生物的生长,该材料将成为替代塑料和延长食品保质期的理想候选材料。FELIX 等^[75]在通过溶剂浇铸法制备的聚己二酸共对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)薄膜中使用橙精油(橙

皮提取物)抑制大肠杆菌。结果表明,橙精油能够迁移到接触物表面,降低大肠杆菌的生长速度。随着研究的深入开展,一些研究发现了精油等天然抗菌剂具有易挥发、特殊气味、抗菌能力低、稳定性差等缺点,必须高剂量使用才能对微生物产生显著的抑制效果。但高剂量使用精油可能会对包装食品的感官特性产生不利影响,还会带来食品安全隐患^[39]。LLANA-RUIZ-CABELLO 等^[76]研究发现了精油的过量使用可能会扰乱代谢,导致基因突变和遗传毒性。因此,未来需要更多的研究以解决这些问题。

溶菌酶和壳聚糖等生物活性物质作为抗菌材料在食品工业中应用也具有很大的潜力^[77-79]。壳聚糖作为一种抗菌且可生物降解的材料,具有出色的成膜性能,使其适用于制作食品包装^[80-81]。但是,由于它的机械、抗菌性能较低,限制了其应用。为了解决这些问题,Bi 等^[82]开发了壳聚糖和原花青素(Proanthocyanidins, PA)组合的抗菌、抗氧化薄膜。PA 的使用不仅增强了所制造薄膜的抗菌、抗氧化能力,还增强了薄膜的机械性能,这归因于酚类材料和壳聚糖之间的分子间相互作用。此外,PA 还可以通过填充壳聚糖膜基质中的空隙体积,并与壳聚糖链建立分子间相互作用(如氢键)改善壳聚糖膜的氧阻隔性能^[83]。AHMADI 等^[84]将壳聚糖与大蒜提取物或百里香混合制成抗菌薄膜,显著提高了壳聚糖薄膜的抗菌效果。此外,WANG 等^[85]通过涂层法制备负载乳酸链球菌肽的壳聚糖/聚(L-乳酸)抗菌膜,并发现了其具有良好的控制释放能力和金黄色葡萄球菌的抗菌活性。ZHANG 等^[86]通过将壳聚糖或溶菌酶共价固定在等离子体处理过的聚乳酸薄膜表面上,发现该薄膜能够显著抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的存活;同时,与对照组相比,两种薄膜可将所包裹草鱼的保质期分别延长 1 d 和 3 d(4 °C 条件下),这说明该材料可在鲜鱼包装中提供抗菌作用。

2 活性食品接触材料控释技术

由于活性物质的释放速度很快,导致食品保质期内活性物质的功能会出现快速下降。控释包装技术的发展将有助于延长活性物质的递送时间并提高释放速率的再现性和可预测性。以对控制腐败因素的最低有效浓度释放,能够显著延长活性食品接触材料的有效期^[87-88]。相关研究表明,多层膜、智能生物聚合物混合、基质交联、封装技术等方式可以作为控释技术达到有效控制活性成分释放的目的^[89-90]。在一些抗菌薄膜包装中,应用三层结构可

使位于中层的抗菌物质的传播速度由内层控制,而外层则防止抗菌剂转移到包装薄膜外,在实现控制释放同时又防止了抗菌成分与食物中的蛋白质和脂质等物质反应^[91]。GEMILI等^[44]开发了具有不同形态特征的醋酸纤维素薄膜,以控制天然抗氧化剂L-抗坏血酸和L-酪氨酸的释放速率;通过增加浇铸溶液中醋酸纤维素的含量和降低薄膜的平均孔径和孔隙率,实现降低抗氧化剂的扩散速率。

3 国内外活性食品接触材料的监管法规 and 标准

活性食品接触材料是指有意加入了能够延长包装食品的保质期、维持或改善包装食品状况活性物质的材料。目前,大多数国家按照食品接触材料的通用法规或标准对其进行监管。但由于该类食品接触材料中的活性物质具有成分复杂、使用条件特殊、能够从食品包装中主动释放等特点,因此,一些国家或国际组织也单独制定了活性食品接触材料的专门法规。2009年5月,欧盟公布了(EC)No. 450/2009《食品接触用活性与智能材料和物品的法规》,包括14个条款和2个附件,规定了活性与智能食品接触材料允许使用物质的要求和申报条件、包装的标识和符合性声明。同时,要求除了可以证明不会发生迁移的物质之外,只允许使用授权物质清单中的物质。但是,欧盟只在2012年6月公布了活性与智能材料受理申请的物质清单,包括白藜芦醇、活性炭等45种物质,目前还没有公布正式授权的物质清单。瑞士也制定了关于活性与智能食品接触材料的法规SR 817.023.21,相关要求与欧盟的(EC)No. 450/2009基本一致^[92]。由于食品行业发展的需要,韩国也在2021年9月公布的《食品用器具、容器和包装的标准与规范》修订版本中,新增了活性与智能包装材料的制造标准,其包括应根据技术发展和领域需求,完善具有特殊功能的活性与智能包装材料标准;制定活性与智能包装材料的制造标准;推进相关食品产业与国际趋势接轨。这是韩国首次将活性包装引入到标准中,说明韩国也在逐步重视活性食品接触材料的应用和发展。除此之外,欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)在2021年3月发布了一份关于提交用于食品接触材料用活性与智能物质及组件申请批准的行政指南,规定了审批程序及相关时间表。同时,德国联邦风险评估机构(Bundesinstitut für Risikobewertung, BfR)也以建议的形式发布了Recommendation XXXVI/3文件,对纤维素吸收垫的加工和使用制定了要求,并列出了允许使用物质名单。

目前,我国还没有针对活性与智能食品接触材

料制定专门的国家标准。2008年,原国家质量监督检验检疫总局发布了广东出入境检验检疫局和宁波出入境检验检疫局起草的SN/T 2196—2008《食品接触材料检验规程 活性及智能材料类》行业标准,规定了活性及智能食品接触材料的抽样、检验、结果判定、标签说明和不合格品的处置,并且在附录中列举了常见的活性及智能食品接触材料种类和应用案例,如活性食品接触材料制品包括用于吸收氧气、乙烯、二氧化碳和水分的脱除剂以及用于抗菌、抗氧化的释放剂^[93]。

4 总结与展望

随着消费者对食品品质及食品安全需求的提高,活性食品接触材料制品的需求日益增高。然而,现有的研究大多关注活性物质的功能特性,而未考虑它们在食品接触材料应用中是否能保持原有特性和功能,限制了活性接触材料商业化应用。因此,今后需要更多的研究投入到新生产工艺的研制以及具有更高稳定性和更优物理化学性能的新活性材料的开发,以便于大规模的商业化生产和使用。

同时,在使用过程中,食品接触材料中的活性物质可能会向食物迁移,从而带来安全隐患,尤其更容易造成迁移的释放型活性材料和纳米材料。活性物质在食品系统中的迁移规律和安全风险也是未来活性食品接触材料领域中需要重点研究的问题。这些研究的开展将为合规性监管的开展提供科学依据及技术手段,为相关管理法规和标准的制定奠定科学基础。

参考文献

- [1] QIAN M Y, LIU D H, ZHANG X H, et al. A review of active packaging in bakery products: Applications and future trends [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 459-471.
- [2] ZENG J, REN X N, ZHU S M, et al. Fabrication and characterization of an economical active packaging film based on chitosan incorporated with pomegranate peel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 1160-1168.
- [3] 王凯利, 马健, 王登科, 等. 不同包装材料和包装形式对食品储藏特性的影响[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2018, 39(5): 58-62.
WANG K L, MA J, WANG D K, et al. Effects of packaging material and form on food storage characteristics [J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 39(5): 58-62.
- [4] MAHMUD J, SARMAST E, SHANKAR S, et al. Advantages of nanotechnology developments in active food packaging [J]. Food Research International, 2022, 154: 111023.
- [5] NIMITKEATKAI H, TECHAVUTHIPORN C, BOONYARITH ONGCHAI P, et al. Commercial active packaging maintaining

- physicochemical qualities of carambola fruit during cold storage [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 32: 100834.
- [6] VISCUSI G, BUGATTI V, VITTORIA V, et al. Antimicrobial sorbate anchored to layered double hydroxide (LDH) nano-carrier employed as active coating on Polypropylene (PP) packaging: application to bread stored at ambient temperature [J]. *Future Foods*, 2021, 4: 100063.
- [7] 吴丹, 周柏林. 一起由酸价、过氧化值超标引起的食物中毒调查分析[J]. *实用妇科内分泌杂志: 电子版*, 2017, 4(27): 145, 147.
- WU D, ZHOU B L. Investigation and analysis of a food poisoning caused by excessive acid value and peroxide value[J]. *Journal of Practical Gynecologic Endocrinology: Electronic Edition*, 2017, 4(27): 145, 147.
- [8] DA COSTA MONÇÃO É, GRISI C V B, DE MOURA FERNANDES J, et al. Active packaging for lipid foods and development challenges for marketing [J]. *Food Bioscience*, 2022, 45: 101370.
- [9] BHARGAVA N, SHARANAGAT V S, MOR R S, et al. Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 385-401.
- [10] BOLUMAR T, LAPEÑA D, SKIBSTED L H, et al. Rosemary and oxygen scavenger in active packaging for prevention of high-pressure induced lipid oxidation in pork patties [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2016, 7: 26-33.
- [11] COMA V. Bioactive packaging technologies for extended shelf life of meat-based products[J]. *Meat Science*, 2008, 78(1-2): 90-103.
- [12] FANG Z X, ZHAO Y Y, WARNER R D, et al. Active and intelligent packaging in meat industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 61: 60-71.
- [13] REALINI C E, MARCOS B. Active and intelligent packaging systems for a modern society[J]. *Meat Science*, 2014, 98(3): 404-419.
- [14] SUNG S Y, SIN L T, TEE T T, et al. Antimicrobial agents for food packaging applications [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 33(2): 110-123.
- [15] 刘好, 郑挺斌. 食品接触材料安全性现状和发展趋势[J]. *饮食科学*, 2018(14): 99.
- LIU H, ZHENG T B. Current situation and development trend of safety of food contact materials [J]. *Diet Science*, 2018 (14): 99.
- [16] MISIOU O, KOUTSOUMANIS K. Climate change and its implications for food safety and spoilage [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021
- [17] SUN X Y, WANG J, DONG M N, et al. Food spoilage, bioactive food fresh-keeping films and functional edible coatings: Research status, existing problems and development trend [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 119: 122-132.
- [18] GEDARAWATTE S T G, RAVENSDALE J T, JOHNS M L, et al. Evaluation of the water-holding and anti-spoilage effect of a bacterial cellulose nanocrystal coating for the storage of vacuum-packaged beef [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 31: 100818.
- [19] NATH D, R S, PAL K, et al. Nanoclay-based active food packaging systems: A review [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 31: 100803.
- [20] GAIKWAD K K, SINGH S, AJJI A. Moisture absorbers for food packaging applications [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17(2): 609-628.
- [21] YILDIRIM S, RÖCKER B, PETERSEN M K, et al. Active packaging applications for food [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(1): 165-199.
- [22] 李丽莎, 马芮萍, 孙世琨, 等. 食品接触材料中有害物质的迁移研究展望[J]. *中国包装*, 2019, 39(6): 58-69.
- LI L S, MA R P, SUN S K, et al. Research prospect of hazardous substances migration in food contact materials [J]. *China Packaging*, 2019, 39(6): 58-69.
- [23] KUORWEL K K, CRAN M J, ORBELL J D, et al. Review of mechanical properties, migration, and potential applications in active food packaging systems containing nanoclays and nanosilver [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(4): 411-430.
- [24] PINMING C, SUKGORN N, SUHATCHO T, et al. Humidity sensor using carboxymethyl cellulose hydrogel membrane [C]. 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [25] GAIKWAD K K, SINGH S, LEE Y S. High adsorption of ethylene by alkali-treated halloysite nanotubes for food-packaging applications [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 16 (3): 1055-1062.
- [26] ABRAL H, ARIKSA J, MAHARDIKA M, et al. Transparent and antimicrobial cellulose film from ginger nanofiber [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105266.
- [27] GAIKWAD K K, SINGH S, NEGI Y S. Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, 18(2): 269-284.
- [28] YILDIRIM S, RÖCKER B, RÜEGG N, et al. Development of palladium-based oxygen scavenger: Optimization of substrate and palladium layer thickness [J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28(8): 710-718.
- [29] GIBIS D, RIEBLINGER K. Oxygen scavenging films for food application [J]. *Procedia Food Science*, 2011, 1: 229-234.
- [30] DEY A, NEOGI S. Oxygen scavengers for food packaging applications: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 90: 26-34.
- [31] KUSWANDI B, JUMINA. Active and intelligent packaging, safety, and quality controls [M]. *Fresh-Cut Fruits and Vegetables*, Amsterdam: Elsevier, 2020: 243-294.
- [32] ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ M H, ARTÉS-HERNÁNDEZ F, ÁVALOS-BELMONTES F, et al. Current scenario of adsorbent materials used in ethylene scavenging systems to extend fruit and vegetable postharvest life [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(3): 511-525.
- [33] PATHAK N, CALEB O J, GEYER M, et al. Photocatalytic and photochemical oxidation of ethylene: potential for storage of

- fresh produce—A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(6): 982-1001.
- [34] PLOTTO A, BAI J, NARCISO J A, et al. Ethanol vapor prior to processing extends fresh-cut mango storage by decreasing spoilage, but does not always delay ripening[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 39(2): 134-145.
- [35] MU H L, GAO H Y, CHEN H J, et al. A novel controlled release ethanol emitter: preparation and effect on some postharvest quality parameters of Chinese bayberry during storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(14): 4929-4936.
- [36] BODBODAK S, RAFIEE Z. Recent trends in active packaging in fruits and vegetables [M]. Eco-Friendly Technology for Postharvest Produce Quality, Amsterdam: Elsevier, 2016: 77-125.
- [37] LATOU E, MEXIS S F, BADEKA A V, et al. Shelf life extension of sliced wheat bread using either an ethanol emitter or an ethanol emitter combined with an oxygen absorber as alternatives to chemical preservatives[J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(3): 457-465.
- [38] PISOSCHI A M, POP A, GAJAILA I, et al. Analytical methods applied to the assay of sulfur-containing preserving agents[J]. Microchemical Journal, 2020, 155: 104681.
- [39] VILELA C, KUREK M, HAYOUKA Z, et al. A concise guide to active agents for active food packaging [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 212-222.
- [40] HANSEN A Å, MOEN B, RØDBOTTEN M, et al. Effect of vacuum or modified atmosphere packaging (MAP) in combination with a CO₂ emitter on quality parameters of cod loins (*Gadus morhua*) [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2016, 9: 29-37.
- [41] 徐芳, 卢立新. 油脂氧化机理及含油脂食品抗氧化包装研究进展[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 23-26.
XU F, LU L X. Research progress on the oil anti-oxidation mechanism and anti-oxidation packaging of fatty food [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 23-26.
- [42] 赵媛, 黄浩河, 苏红霞, 等. 食品包装用抗氧化材料的研究进展[J]. 湖南包装, 2021, 36(2): 22-25.
ZHAO Y, HUANG H H, SU H X, et al. Research progress of antioxidant materials for food packaging[J]. Hunan Packaging, 2021, 36(2): 22-25.
- [43] 王海丽, 杨春香, 杨福馨, 等. 抑菌及抗氧化活性食品包装膜的研究进展[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 83-88.
WANG H L, YANG C X, YANG F X, et al. Research progress in antimicrobial and antioxidant active food packaging film [J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 83-88.
- [44] GEMILI S, YEMENICIOĞLU A, ALTINKAYA S A. Development of antioxidant food packaging materials with controlled release properties [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(3): 325-332.
- [45] LUZI F, DEL BUONO D, ORFEI B, et al. Lemna minor aqueous extract as a natural ingredient incorporated in poly (vinyl alcohol) -based films for active food packaging systems [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 32: 100822.
- [46] MANTHOU V, VLACHOPOULOU M. Bar-code technology for inventory and marketing management systems: A model for its development and implementation [J]. International Journal of Production Economics, 2001, 71(1-3): 157-164.
- [47] MENZEL C, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C, CHIRALT A, et al. Antioxidant starch films containing sunflower hull extracts [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 214: 142-151.
- [48] SMAOUI S, BEN HLIMA H, TAVARES L, et al. Application of eco-friendly active films and coatings based on natural antioxidant in meat products: A review [J]. Progress in Organic Coatings, 2022, 166: 106780.
- [49] LORENZO M E, CASERO C N, GÓMEZ P E, et al. Antioxidant characteristics and antibacterial activity of native woody species from Catamarca, Argentina [J]. Natural Product Research, 2022, 36(4): 885-890.
- [50] WRONA M, SILVA F, SALAFRANCA J, et al. Design of new natural antioxidant active packaging: Screening flowsheet from pure essential oils and vegetable oils to *ex vivo* testing in meat samples [J]. Food Control, 2021, 120: 107536.
- [51] RODRÍGUEZ G M, SIBAJA J C, ESPITIA P J P, et al. Antioxidant active packaging based on papaya edible films incorporated with *Moringa oleifera* and ascorbic acid for food preservation [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105630.
- [52] 谢菁, 卢立新, 潘嘹, 等. 基于 α -生育酚抗氧化膜的冷鲜猪肉保鲜包装研究 [J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 132-136.
XIE J, LU L X, PAN L, et al. Study on preservation packaging of chilled pork based on α -tocopherol antioxidant films [J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 132-136.
- [53] ROY S, PRIYADARSHI R, EZATI P, et al. Curcumin and its uses in active and smart food packaging applications—A comprehensive review [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131885.
- [54] 庆九, Myint Khaing Zar, 俞新南, 等. 植物源抑菌剂的抗氧化性及其在食品中的应用 [J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(3): 113-117.
QING J, MYINT K Z, YU X N, et al. Antioxidant properties of plant-based antimicrobial and its application in foods [J]. China Food Additives, 2021, 32(3): 113-117.
- [55] ZHONG C, HOU P F, LI Y X, et al. Characterization, antioxidant and antibacterial activities of gelatin film incorporated with protocatechuic acid and its application on beef preservation [J]. LWT, 2021, 151: 112154.
- [56] NEGM N A, KANA M T H A, ABUBSHAIT S A, et al. Effectuality of chitosan biopolymer and its derivatives during antioxidant applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 1342-1369.
- [57] 陈晨伟, 段恒, 杨福馨, 等. 释放型食品抗氧化活性包装膜研究进展 [J]. 包装工程, 2014, 35(13): 36-42, 80.
CHEN C W, DUAN H, YANG F X, et al. Research progress in release-type food antioxidant active packaging film [J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 36-42, 80.
- [58] 邓桂芳. 抗菌薄膜包装材料化解食品安全危机 [J]. 湖南包装, 2014(2): 6-12.
DENG G F. Antimicrobial film packaging materials resolve food safety crisis [J]. Hunan Packaging, 2014(2): 6-12.

- [59] 银娜, 梁俊, 高志贤. 银纳米簇用于食品包装污染物的检测及其抗菌性能的应用[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 44-50.
YIN N, LIANG J, GAO Z X. Silver nanoclusters for the detection of food packaging contaminants and their application in antibacterial properties[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 44-50.
- [60] 施申伟, 李婷, 东为富. 食品抗菌包装研究进展[J]. 塑料包装, 2018, 28(4): 1-8, 41.
SHI S W, LI T, DONG W F. Research progress of antibacterial packaging for food[J]. Plastics Packaging, 2018, 28(4): 1-8, 41.
- [61] DEY A, PANDEY G, RAWTANI D. Functionalized nanomaterials driven antimicrobial food packaging: A technological advancement in food science[J]. Food Control, 2022, 131: 108469.
- [62] LENCOVA S, ZDENKOVA K, DEMNEROVA K, et al. Short communication: Antibacterial and antibiofilm effect of natural substances and their mixtures over *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* [J]. LWT, 2022, 154: 112777.
- [63] 路玲, 李莉, 罗自生. 纳米抗菌剂在食品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(9): 275-281.
LU L, LI L, LUO Z S. Application and development of nano antimicrobial agent in food[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(9): 275-281.
- [64] DANI R, SINGH RAWAL Y, MURDIA M, et al. A review on applications of nanomaterials in hotel industry: Prospects for food processing, packaging, and safety [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 11247-11249.
- [65] ZHAO X X, TIAN R F, ZHOU J Y, et al. Multifunctional chitosan/grape seed extract/silver nanoparticle composite for food packaging application [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 207: 152-160.
- [66] ALIZADEH-SANI M, MOHAMMADIAN E, MCCLEMENTS D J. Eco-friendly active packaging consisting of nanostructured biopolymer matrix reinforced with TiO₂ and essential oil: Application for preservation of refrigerated meat [J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126782.
- [67] PRAKASH J, CHO J, MISHRA Y K. Photocatalytic TiO₂ nanomaterials as potential antimicrobial and antiviral agents: Scope against blocking the SARS-COV-2 spread[J]. Micro and Nano Engineering, 2022, 14: 100100.
- [68] 郭志荣. 新型铜基金属氧化物纳米抗菌剂对食源性致病菌的杀灭活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
GUO Z R. Study on the germicidal activity of new copper-based metal oxide nano-antimicrobial agents against food-borne pathogenic bacterial[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [69] 王微山, 于苓, 宋翠. 纳米材料在食品包装领域的应用及存在的安全性问题[J]. 中国包装, 2008, 28(5): 81-82.
WANG W S, YU L, SONG C. Application and safety problems of nano-materials in the field of food packaging. [J]. China Packaging, 2008, 28(5): 81-82.
- [70] LIU Y P, ZHU S, GU Z J, et al. Toxicity of manufactured nanomaterials[J]. Particuology, 2022, 69: 31-48.
- [71] 黄皓, 李莉, 秦雨, 等. 纳米氧化锌改性 LDPE 食品包装薄膜中锌粒子的迁移规律[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 278-283.
HUANG H, LI L, QIN Y, et al. Migration rules of Zn from nano-ZnO modified LDPE food packaging films[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 278-283.
- [72] KHAN M, KHAN M S A, BORAH K K, et al. The potential exposure and hazards of metal-based nanoparticles on plants and environment, with special emphasis on ZnO NPs, TiO₂ NPs, and AgNPs: A review [J]. Environmental Advances, 2021, 6: 100128.
- [73] RODRIGUES ARRUDA T, CAMPOS BERNARDES P, ROBLEDO FIALHO E MORAES A, et al. Natural bioactives in perspective: The future of active packaging based on essential oils and plant extracts themselves and those complexed by cyclodextrins [J]. Food Research International, 2022, 156: 111160.
- [74] MA K X, ZHE T T, LI F, et al. Sustainable films containing AIE-active berberine-based nanoparticles: A promising antibacterial food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107147.
- [75] FELIX DE ANDRADE M, DIEGO DE LIMA SILVA I, ALVES DA SILVA G, et al. A study of poly (butylene adipate-co-terephthalate)/orange essential oil films for application in active antimicrobial packaging[J]. LWT, 2020, 125: 109148.
- [76] LLANA-RUIZ-CABELLO M, PICHARDO S, MAISANABA S, et al. *In vitro* toxicological evaluation of essential oils and their main compounds used in active food packaging: A review [J]. Food and Chemical Toxicology, 2015, 81: 9-27.
- [77] KONGKAOROPHTAM P, PIROONPAN T, PASANPHAN W. Chitosan nanoparticles based on their derivatives as antioxidant and antibacterial additives for active bioplastic packaging [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 257: 117610.
- [78] JOVANOVIĆ J, ĆIRKOVIĆ J, RADOJKOVIĆ A, et al. Chitosan and pectin-based films and coatings with active components for application in antimicrobial food packaging [J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 158: 106349.
- [79] 王子璇, 谢晶, 薛斌, 等. 壳聚糖食品包装膜研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 303-307, 311.
WANG Z X, XIE J, XUE B, et al. Research progress of chitosan food packaging film [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 303-307, 311.
- [80] MCARDLE R A, MARCOS B, MULLEN A M, et al. Influence of HPP conditions on selected lamb quality attributes and their stability during chilled storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 66-72.
- [81] LIU J L, HUANG J Y, HU Z H, et al. Chitosan-based films with antioxidant of bamboo leaves and ZnO nanoparticles for application in active food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 363-369.
- [82] BI F Y, ZHANG X, BAI R Y, et al. Preparation and characterization of antioxidant and antimicrobial packaging films based on chitosan and proanthocyanidins [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 11-19.
- [83] SOBEH M, MAHMOUD M F, ABDELFATTAH M A O, et al. A proanthocyanidin-rich extract from *Cassia abbreviata* exhibits

- antioxidant and hepatoprotective activities *in vivo* [J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 213: 38-47.
- [84] AHMADI H, JAHANSHAHI M, PEYRAVI M, et al. A new antibacterial insight of herbal chitosan-based membranes using thyme and garlic medicinal plant extracts [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130114.
- [85] WANG H L, LIU H, CHU C J, et al. Diffusion and antibacterial properties of nisin-loaded chitosan/poly (L-lactic acid) towards development of active food packaging film [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(8): 1657-1667.
- [86] ZHANG M M, TAO N P, LI L, et al. Non-migrating active antibacterial packaging and its application in grass carp fillets [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 31: 100786.
- [87] 唐亚丽, 黄秀玲. 缓释抗菌食品包装研究现状 [J]. *包装工程*, 2014, 35(9): 132-135.
- TANG Y L, HUANG X L. Research status of sustained-release antimicrobial food packaging [J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(9): 132-135.
- [88] 陈曦, 卢立新, 丘晓琳, 等. 食品控释抗菌包装膜的控释机理研究进展 [J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(1): 1-7.
- CHEN X, LU L X, QIU X L, et al. Advances in mechanism research on controlled release antimicrobial food packaging films [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2020, 39(1): 1-7.
- [89] SILVA-WEISS A, QUILAQUEO M, VENEGAS O, et al. Design of dipalmitoyl lecithin liposomes loaded with quercetin and rutin and their release kinetics from carboxymethyl cellulose edible films [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 224: 165-173.
- [90] TAMPAU A, GONZÁLEZ-MARTÍNEZ C, CHIRALT A. Release kinetics and antimicrobial properties of carvacrol encapsulated in electrospun poly-(ϵ -caprolactone) nanofibres. Application in starch multilayer films [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 79: 158-169.
- [91] 杨凌霄, 文声扬, 闫金姣, 等. 多层抗菌包装膜材料的研究进展 [J]. *包装与食品机械*, 2011, 29(2): 42-46.
- YANG L X, WEN S Y, YAN J J, et al. Research of multilayer antibacterial food packaging [J]. *Packaging and Food Machinery*, 2011, 29(2): 42-46.
- [92] 姜婷. 欧盟食品接触性活性和智能材料及物品新规 ((EC) No₄₅₀/2009) 解读 [J]. *标准科学*, 2010(1): 94-96.
- JIANG T. Interpretation of (EC) No₄₅₀/2009 on the active and intelligent materials and articles intended to come into contact with food [J]. *Standard Science*, 2010(1): 94-96.
- [93] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 食品接触材料纸、再生纤维材料使用改性聚苯醚测定纸和纸板迁移物的试验方法: SN/T 4381—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Food contact materials-Paper and regenerated fibre-Determination of migration from paper and board using modified polyphenylene oxide: SN/T 4381—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.