

肉品保鲜包装材料与新技术研究进展

张乾坤^{1,2,3}, 康桦华², 刘梦竹³, 涂杜², 徐志宏^{2,3*}

(1. 华中农业大学 食品科学技术学院, 武汉 430070; 2. 广东省农业科学院动物卫生研究所, 广州 510640; 3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室肇庆分中心, 广东 肇庆 526238)

摘要: **目的** 对现阶段肉品保鲜包装材料及相应的包装新技术进行研究总结, 以为肉类食品保鲜提供一定参考。**方法** 通过查阅国内外相关文献, 总结当前肉类食品使用的包装材料及包装技术, 综述真空包装、气调包装、智能包装的研究进展, 分析其存在的优点和不足, 并对其未来发展趋势进行展望。**结论** 包装可对肉品起到直接的保护作用, 在一定程度上延长了肉品的货架期。新型包装材料及配套包装技术的应用对提升肉品质量和安全至关重要。未来更加安全高效便捷的新型肉类食品包装材料及不同包装技术间的结合会成为行业发展的大趋势。

关键词: 肉品保鲜; 包装材料; 包装技术; 货架期

中图分类号: TB484; TS206.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0126-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.015

Research Progress in Packaging Materials and New Technologies for Meat Preservation

ZHANG Qiankun^{1,2,3}, KANG Huahua², LIU Mengzhu³, TU Du², XU Zhihong^{2,3*}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Animal Health, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Zhaoqing Branch Center of Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agricultural Science and Technology, Guangdong Zhaoqing 526238, China)

ABSTRACT: The work aims to study and summarize the current packaging materials and corresponding packaging technologies for meat preservation, in order to provide some reference for meat preservation. By reviewing relevant literature in China and abroad, the current packaging materials and technologies used in meat products were summarized, the research progress of vacuum packaging, modified atmosphere packaging, and intelligent packaging was reviewed and their advantages and disadvantages were analyzed and the future development trends were prospected. Packaging can directly protect meat products and extend their shelf life in a certain extent. The application of new packaging materials and supporting packaging technologies is crucial for improving the quality and safety of meat products. In the future, safer, more efficient and convenient new packaging materials for meat products and the combination of different packaging technologies will become a major trend in industry development.

KEY WORDS: meat preservation; packaging materials; packaging technology; shelf life

我国畜禽肉品的需求量巨大, 2020 年鲜肉、冷藏肉的产量为 2 554.1 万 t, 2021 年达到 3 298.2 万 t, 2022 年为 3 632.5 万 t^[1]。随着人们生活水平的提高,

以及“调猪”变“调肉”政策的实施, 消费者更加关注肉品的安全性和感官品质。肉类的营养丰富, 在屠宰加工、物流运输、贮藏及销售过程中, 如果冷链不完善

收稿日期: 2023-08-08

基金项目: 广东省科技计划 (2021B1212050021); 广东省农业科学院学科团队建设项目 (202122TD); 岭南现代农业科学与技术广东省实验室肇庆分中心团队建设项目 (P20211154-0205)

*通信作者

或温度控制不当, 则极易滋生腐败菌或致病菌, 影响肉品的食用安全性和产品货架期。研究发现, 肉品中常见的腐败菌和致病菌有芽孢杆菌、假单胞菌、变形杆菌、枯草杆菌、沙门氏菌、炭疽杆菌、大肠杆菌、单核增生李斯特菌等, 某些病原微生物还可引发食源性疾病或食物中毒^[2-3]。目前, 经分割包装的冷鲜肉越来越受到消费者的欢迎, 为了尽可能避免肉类食品发生二次污染, 需要进一步提升肉品包装的质量。当前, 针对冷鲜肉品保鲜专用包装材料和技术, 以及新型包装材料和技术的研究还不够。文中总结了肉品包装材料和新技术的研究进展, 分析了不同包装方式对肉类品质变化的影响, 提出了各包装类型存在的问题及未来的发展趋势。

1 肉品保鲜包装材料

采用适宜的包装材料可有效避免外界污染, 维持包装肉品的新鲜品质。选择肉品包装材料应满足以下 2 个特性: 品质保护性和加工适应性。品质保护性体现在延长肉类食品货架期, 维持适度水分, 减少外界微生物的污染, 便于贮藏运输和流通, 且具有相应的阻隔性能和稳定性。加工适应性包括力学性能(如抗拉强度、延伸度等)、热封性、商品性、经济性及节约资源性等。当前研究得较多的肉类食品包装材料包括传统塑料复合包装、纳米复合包装、活性包装、可食性膜和一些新型可降解包装材料。

1.1 传统塑料复合包装

传统包装塑料具有不可替代的多重优势, 仍是当

今市场消费的主流。常见的材料有聚乙烯 (polyethylene, PE)、聚丙烯 (polypropylene, PP)、尼龙 (polyamide, PA)、聚酯 (polyethylene terephthalate, PET)、聚偏二氯乙烯 (polyvinylidene chloride, PVDC)、聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC)、铝箔等^[4], 其性能对比如表 1 所示^[5]。PE 包装的阻水阻湿性较好, 具有优良的化学稳定性和耐低温性能, 但其阻气性较差。尼龙包装的力学强度较高、韧性较好, 具有良好的耐热性和耐磨性, 但其水蒸气透过率较高。PET 塑料具有较好的耐热性和化学稳定性, 吸水率低, 且柔软性好。PVDC 具有优良的耐磨性、柔韧性、耐化学腐蚀性、阻氧性和阻湿性, 但不耐热封。

单层或单一成分的包装材料对肉品的保鲜作用有限, 目前研究得较多的有多层共挤复合膜材料, 如 PA/PE、PET/PE、PVDC/PE、乙烯-乙醇共聚物 (ethylene vinyl alcohol copolymer, EVOH)、聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 复合材料等, 它们具有高阻隔、高密封、耐高温、耐酸碱等多重优势。利用此类复合材料包装肉类食品, 可显著抑制贮藏期间肉品微生物的生长, 脂肪和蛋白质的氧化, 贮藏损失及色泽劣变等。Pettersen 等^[6]对比研究了 PE/EVOH/PA/PE、PET/EVOH/PE、PS/EVOH/PE、HDPE 包装材料对鸡胸肉的保鲜效果, 结果表明, HDPE 包装的阻氧性最差, 其鸡肉微生物生长得最多、气味最差。呼和等^[7]研究了丙烯酸乙基己酯 (ethylhexyl acrylate, EHA) / 聚乙烯复合膜的性能, 以及包装鲜猪肉的保鲜效果。EHA 由聚酰胺 6 (polyamide 6, PA6) 与乙烯-乙醇共聚物共混挤出制得, 然后再与 PE 复合, 制得 EHA/PE 薄膜。经测定, 该复合膜的阻氧性和阻湿性

表 1 常见包装材料性能的对比
Tab.1 Comparison of performance of common packaging materials

材料	密度/(g·cm ⁻³)	O ₂ 透过率/ (cm ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹ ·kPa ⁻¹)	CO ₂ 透过率/ (cm ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹ ·kPa ⁻¹)	水蒸气透过率/ (g·m ⁻² ·d ⁻¹)
低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE)	0.915~0.940	38.49~128.30	75.99~759.93	6~23.2
高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE)	0.941~0.965	5.13~39.48	38.49~98.69	4~10
聚氯乙烯 (PVC)	1.16~1.35	1.48~3.45	14.80~453.98 (增塑) 4.44~9.87 (硬质)	15~40 (增塑) 30~40 (硬质)
聚偏二氯乙烯 (PVDC)	1.60~1.71	0.08~0.26	0.49~1.48	1.5~5
聚苯乙烯 (PS)	1.02~1.05	49.35	177.65	100~125
聚酯 (PET)	1.25~1.45	0.49~0.99 (非定向) 0.44 (定向)	2.52~5.03 (非定向) 2.18 (定向)	
乙烯-乙醇共聚物 (EVOH)	1.13~1.21	0.03~0.05		16~18
尼龙 6 (PA6)	1.13	0.39	1.48~1.88	84~3100

注: O₂、CO₂ 透过率的测定条件为 22~25 °C, 膜厚 0.025 4 mm; 水蒸气透过率的测定条件为温度 37.8 °C、相对湿度 90%。

均优于 PA 膜、EVOH 膜、EHA 膜和 PA6/PE 复合膜。保鲜实验结果表明,经 EHA/PE 膜包装的冷鲜肉的货架期达到 22 d, PA6/PE 膜包装冷鲜肉的货架期为 18 d。王维婷等^[8]研究了 2 种新型高阻隔气调包装膜材 (PP/EVOH/PP、PP/PA/PP) 对冷鲜羊肉的保鲜效果,测定了贮藏期间羊肉的菌落总数 (Total Viable Count, TVC)、总挥发性盐基氮 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) 值、pH、色差、汁液损失值和肌原纤维小片化指数 (myofibril fragmentation index, MFI) 等指标。结果表明,PP/EVOH/PP 材料可维持较好的肉质,PP/PA/PP 材料可有效抑制羊肉贮藏期间的汁液损失。由此可见,高阻隔性包装材料对于肉品保鲜至关重要。对于不同种类的肉品,可能适宜的包装材料也有所不同,并不是阻隔性越好越有利于肉品的保鲜,还受到肉品自身特点、存放温度、存放湿度、气体成分等因素的共同影响。

1.2 纳米复合包装

纳米复合包装材料是结合纳米技术,通过纳米合成,在分子、原子水平上设计并制造出的具备某种特性或功能的包装材料^[9]。当前的研究多集中于聚合物基纳米复合材料,即将纳米级填料分散于柔性聚合物基体中,复合方法主要包括纳米微粒填充法、纳米微粒原位复合法、聚合物基体原位聚合法、两相同步原位合成法等^[10]。目前,常用的纳米微粒有 Ag、ZnO、SiO₂、TiO₂ 等,聚合物有 PE、PP、PA、PET、PVC 等^[11]。相较于传统的包装材料,纳米复合材料具有多重优势,如良好的阻隔性、耐热性、耐磨性、可塑性,优良的加工性能,能够提升产品的品质,延长食品的货架期,具有良好的生态性及更长的使用寿命^[12-13]。

在肉品包装领域,针对纳米复合抗菌包装材料的研究较多。如 Amna 等^[14]以可生物降解的聚氨酯为原料,添加初榨橄榄油和纳米 ZnO,通过静电纺丝方法研制出一种新型抗菌复合包装垫。针对 2 种常见的食源性致病菌 (金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门氏菌) 进行了抑菌试验,结果表明,橄榄油的加入影响了聚氨酯纳米纤维的形态,纳米复合包装能够抑制病原菌的生长。由此,可将纺丝毡作为前瞻性抗菌包装,以延长肉类/肉制品的货架期。在使用这种材料前,还需要进行详细研究,以评价其毒性。

此外,优化纳米复合材料制备工艺对提升材料的力学性能和阻隔性至关重要,对于进一步拓展肉类食品包装材料的种类有着十分重要的意义。李世杰^[15]制备了一种有机蒙脱土/超支化 PA6 纳米复合材料,研究表明,当蒙脱土的质量分数为 3% 时,复合材料的拉伸强度得到明显提升。之后,将该纳米复合材料经流延成膜和双向拉伸,制备了双向拉伸包装薄膜,并表征了其宏观性能。结果表明,在蒙脱土质量分数为

3%,且纵向拉伸比值、横向拉伸比值分别为 3、3 时,所制备薄膜的性能最佳,其阻水性和阻氧性得到大幅提升。李潇潇等^[16]通过添加聚乙二醇 200 (polyethylene glycol 200, PEG200),对三元纳米复合材料乙酰化纤维素纳米晶体 (Acetylated cellulose nanocrystals, ACNs) /蒙脱土 (montmorillonite, MMT) /聚 3-羟基丁酸酯-co-3-羟基乙酸酯 (poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyacetate), PHBH) 进行了增塑改性,探究了不同添加量的 PEG200 对纳米复合材料性能的影响。表征结果显示,添加少量 PEG200 可提高三元纳米复合材料 ACNs/MMT/PHBH 的韧性和阻氧阻湿性能,当添加量 (质量分数) 为 6% 时,其断裂伸长率增加了 29.9%;当添加量为 4% 时,材料表现出最佳的阻隔性,其水蒸气透过系数 (Water vapor permeability coefficient, WVP) 和氧气透过系数 (Oxygen permeability coefficient, OP) 分别为 26.48 g/(m²·d)、28.46 cm³/(m²·d)。

纳米材料的引入为肉类食品包装提供了新的方法和技术,可对肉类食品起到抑菌、防腐的效果。目前,纳米保鲜材料的研究和应用尚存在诸多不足,如主要将纳米保鲜膜应用于蔬菜水果包装,在肉类保鲜领域的应用相对较少;纳米粒子与有机聚合物或其他高分子材料间的作用机理还需进一步研究。此外,纳米保鲜材料的制作成本较高、成膜基材少,且其安全性还未完全得到证实。未来可进一步扩展纳米包装材料在肉品保鲜领域的应用,研究纳米材料结合气调包装等技术对肉品感官品质的影响。

1.3 活性包装

活性包装材料是将抗菌剂、抗氧化剂、气味吸收剂、水分控制剂等活性物质通过共混、涂覆、加入小袋或衬垫等方式与包装材料结合而构成的活性包装系统,使得食品、包装与环境相互作用,从而达到提升肉品感官品质、延长肉品货架期的目的^[17-18]。目前,可将常见的抗菌活性物质分为以下几类:精油,如生姜精油、肉桂精油、迷迭香精油、牛至精油、葡萄籽精油等;酶,如几丁质酶、溶菌酶、葡萄糖氧化酶等;细菌素,如乳酸链球菌素、那他霉素、片球菌素等;抗菌聚合物,如壳聚糖、月桂酸酯、环六亚甲基四胺等;有机酸及其他有机化合物,如乳酸、柠檬酸、苯甲酸钠等;抗菌性纳米颗粒,如银、铜、二氧化硅、氧化锌等。根据活性包装的原理可分为吸收型和释放型 2 类,从功能上又可分为抗菌活性包装、抗氧化活性包装、水分和二氧化碳控制包装及除异味活性包装等^[19]。吸收型活性包装主要有水分清除型和氧气清除型 2 类。可将有效的水分清除剂进一步分为 2 种主要类型:清除顶部空间湿度的相对湿度 (Relative Humidity, RH) 控制器 (如干燥剂)、吸收液体的水分去除剂。后者的应用可以采用衬垫形式,通常被放在包装产品下面。这种衬垫

大多由多孔材料、聚合物(如 PP、PE)、发泡 PS 片材与高吸水性聚合物/矿物/盐(聚丙烯酸酯盐、羧甲基纤维素、淀粉共聚物、二氧化硅/硅酸盐)结合而成^[20]。有研究表明,以壳聚糖、羧甲基纤维素钠为基材,加入纳米蒙脱土,然后采用氯化钙交联制备海绵衬垫,其吸湿性得到显著增强,可应用于畜禽鲜肉的保鲜^[21]。还有研究证明,半乳糖基葡聚糖(从植物中提取)气凝胶具有应用于肉类包装吸湿材料的潜力^[22]。释放型活性包装主要有 CO₂ 释放装置、抗氧化、抗菌包装体系 3 类。在肉品保鲜领域,研究得较多的主要有抗氧化和抗菌活性包装。

茶提取物作为天然的抗氧化剂,对清除自由基、抑制肉品蛋白质和脂质氧化具有良好的作用,将此类活性物质与包装膜结合,有望进一步拓展肉类包装材料的保鲜性能。Yang 等^[23]首先从干酒糟及其可溶物中提取蛋白质,并制备蛋白膜,然后分别将绿茶提取物(Green Tea Extract, GTE)、乌龙茶提取物(Oolong Tea Extract, OTE)和红茶提取物(Black Tea Extract, BTE)加入蛋白膜中制备出抗氧化膜。将含茶提取物的蛋白膜应用于猪肉包装,将对照样品装在聚对苯二甲酸乙二醇酯盒中,在 4 °C 下贮存 10 d。结果表明,采用含有 GTE、OTE、BTE 蛋白膜包装猪肉的脂质氧化率低于对照组;在 3 种蛋白膜中,含 GTE 蛋白膜的包装具有最大的抗氧化活性。另外,茶提取物的加入对膜物理性质的影响不大,但对 ABTS、DPPH 自由基的清除作用较明显。上述结果表明,含茶提取物的蛋白膜可作为良好的抗氧化猪肉包装材料,其中绿茶提取物的效果最好。蔡月等^[24]制备了一种茶多酚@沸石咪唑酯骨架材料/壳聚糖/海藻酸钠复合活性包装膜。经分析可知,纳米材料茶多酚@沸石咪唑酯骨架材料的加入使得包装膜表现出良好的抗氧化和抗菌活性,当添加量(质量分数)为 5%时可显著提高复合膜的热稳定性和力学性能,明显提升了活性膜的阻隔性。该活性包装材料可生物降解,未来有望应用于肉品保鲜领域。

代丹丹^[25]研究了一种尼龙 11/聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)/有机蒙脱土共混材料阻隔膜。首先,制备了有机蒙脱土(Organic montmorillonite, OMMT)改性聚乙烯醇,通过干燥粉碎工艺制成颗粒,然后将其与尼龙 11(Polyamide 11, PA11)进行熔融共混,制得高阻隔薄膜材料。其次,制备了脱氧剂小包(配方为氯化钠改性铁粉、纳米活性炭和沸石),并将脱氧剂小包与制得的高阻隔包装膜结合,探究了活性包装体系的保鲜效果。实验结果表明,采用复配脱氧剂配方后其脱氧效果得到增强,可明显减缓模型食品过氧化值(Peroxide Value, POV)的升高,且高阻隔薄膜材料 PA11/PVA/OMMT₁对减缓食品 POV 值上升的效果最为明显。

目前,针对活性包装膜用于肉品保鲜包装的研究

较多。抗菌剂或抗氧化剂的加入可较好地维持包装肉品的感官品质,延长其货架期。今后可通过微胶囊、多孔吸附等技术调控活性物质的释放速率,使其更接近于食品腐坏速率,以期确定不同食品所需的目标释放速率;可通过加入色素、香料、营养素等成分进一步改善包装肉品的感官特性;可研究活性膜与其他技术的联合作用,如气调保鲜、纳米包埋技术、辐照、超声波及超高压技术等。

1.4 新型可降解包装材料

为了降低传统合成塑料对环境造成的污染,实现包装的环保性和可持续发展,研究新型绿色包装材料成为当下的热点。针对可食膜的研究,国内外已有大量文献报道,它作为一种可降解绿色环保的保鲜材料具有广阔的应用潜力。例如,抗氧化可食膜为一类功能性包装材料,向成膜基质中添加抗氧化剂等活性成分,通过涂抹或包裹等方式覆于食品表面,从而达到阻隔气体、吸收氧气或清除有害物质的作用,同时降低脂质和蛋白质氧化速率,保证食品安全,延长食品货架期^[26-27]。严碧云等^[28]研究了壳聚糖-蒜姜复合膜对冷却猪肉的保鲜效果,为大蒜、生姜在保鲜领域的应用提供了理论及技术参考。徐鑫等^[29]研究发现,采用透明质酸和青钱柳叶浸渍液复合可食膜联合微冻保鲜,可减缓猪肉蛋白质和脂质氧化进程,将猪肉的保鲜期延长至 32 d。

除可食性保鲜膜外,国内外也大量报道了新型可降解包装材料。选用可降解成分在一定程度上缓解了“白色污染”,降低了环境负荷。美国化学学会(The American Chemical Society, ACS)报道了一种新型生物可降解的包装薄膜材料,利用从牛奶中提取的酪蛋白来制备包装薄膜,经研究,它具有更小的微孔,且其阻氧性能比现有包装塑料薄膜材料更佳。之后通过加入柑橘果胶对材料进行改性,进一步增加了薄膜的韧性,提升了耐热性和耐湿性^[30]。此外,将可降解成分与具有特定抗氧化或抗菌等功能的天然活性成分提取物结合,制备新型可降解活性包装材料,可能成为今后新的研究方向,具有一定的应用前景^[31]。如张晓燕等^[32]制备了聚碳酸亚丙酯(polypropylene carbonate, PPC)/PVA/PPC 及 PPC/PVA/PPC-海藻糖(trehalose, TH)生物可降解复合膜,研究了它对冷鲜猪肉的保鲜和护色作用。实验结果表明,添加 TH 的包装膜的综合性能较好,采用该膜进行真空包装的冷鲜肉的货架期达到 28~32 d。还有研究表明,在聚乳酸/聚乙烯醇/聚己内酯生物可降解复合膜中添加乳酸链球菌素,可使真空包装冷鲜猪肉的货架期延长 4~5 d,达到 21~23 d,且可更好地维持贮藏期肉品的色泽^[33]。随着人们食品安全意识的提高,消费者更倾向于选择高品质、高营养的新鲜天然产品,复合生物基薄膜会受到越来越多的关注。

2 肉品保鲜包装技术

微生物的生长繁殖、肉品自身酶促反应,以及肉类发生机械损伤和氧化作用等是导致肉品腐坏的主要因素。针对鲜肉进行有效的包装,可减少与外界环境的接触,防止肉品在贮藏、流通和销售中发生二次污染^[34]。虽然真空包装和气调包装的适用条件有所不同,但都是通过改变包装内的气体环境来达到肉品保鲜的效果。目前,真空包装已广泛应用于冷鲜肉和加工肉制品中,针对肉类食品的气调包装,国内外已有较多应用研究。智能包装是多种先进技术的融合,未来其应用前景广阔。

2.1 真空包装

真空包装(Vacuum Packaging, VP)极大地降低了肉品周围的空气密度,延缓了蛋白质和脂肪的氧化,再辅以高阻隔性材料包装,最大限度地抑制了好氧性微生物的生长。目前,可将冷鲜肉的真空包装分为3种类型:真空收缩包装、真空热成型包装和真空贴体包装^[35]。真空收缩包装在冷鲜肉中应用得最多,通常需要将真空密封好的肉品放入热水或热通道中完成收缩过程,使包装紧贴于肉品表面。此类包装常采用多层共挤PVDC材质,具有良好的阻隔性能、热封性及韧性等^[36]。真空热成型包装借助适当模具制成所需的薄膜形状,膜材质轻,使用便捷,适用于多种肉类产品,此类包装常采用PP、PET、PVC、PS等材质^[37-38]。真空贴体包装是在加热与抽真空的共同作用下将盖膜紧贴于产品,并与基板托盘一同封合,此类包装具有良好的阻隔性能和较高的强度。托盘常采用PVC或PET高阻隔复合材料,盖膜通常采用多层共挤复合材料,内层一般为乙烯-醋酸

乙烯酯共聚物(Ethylene-vinyl acetate copolymer, EVA)树脂^[39]。

有些研究对比了真空热缩包装、真空贴体包装和气调包装对(0±2)°C下贮藏的冷鲜鹿肉质地的影响。以TVB-N值、pH、菌落总数和出水率为评价指标,结果表明,真空热缩包装鹿肉的保质期可达70 d,气调包装鹿肉的保质期只有7 d,但产品的色泽更好^[40]。Pennacchia等^[41]在4°C空气下或真空包装中保存9种不同的牛肉样品,并测定贮藏0、7、20 d后样品的菌落数。结果表明,真空包装降低了热杀索丝菌、假单胞菌和肠杆菌科细菌的活菌数量,但对乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)的生长无影响;采用真空包装贮藏主要影响肉的活菌数量,不一定影响肉上微生物种群的多样性;在空气或真空包装牛肉样品中普遍存在发光细菌,表明这种微生物可能在肉类的腐败过程中起着重要作用。

总体来讲,真空包装可使鲜肉具有较长的货架期,在包装内压力的影响下可能出现肉品变形和汁液流失加重等问题。目前,较多研究针对真空包装与其他保鲜技术的联合应用,真空包装与普通包装、气调包装保鲜效果的对比,以及不同阻隔性真空包装材料的保鲜效果等。真空包装技术与其他保鲜技术的联合应用如表2所示。

2.2 气调包装

气调包装(Modified Atmosphere Packaging, MAP)又称改善气氛包装,指采用具有良好阻隔性能的包装材料,并填充单一或混合气体(O₂、CO₂、N₂等),以置换出包装内的空气,破坏微生物的生长环境,减缓氧化反应速率,从而达到抑菌、防腐、延长

表2 真空包装技术与其他保鲜技术的联合应用

Tab.2 Joint application of vacuum packaging technology and other preservation technologies

保鲜方式	处理方式	结果	参考文献
真空包装+复配抗冻剂+微冻	先用复配抗冻剂处理猪肉,使猪肉的冰点降至-2.7°C,再用真空包装于-4°C下微冻贮藏	货架期延长了4 d,猪肉肌纤维的完整性较好	[42]
真空包装+复合调味料+冷藏	用盐、丁香、肉桂及其复合调味料处理海鲈鱼片,再采用真空包装于4°C下贮藏	复合调料处理后鱼片的持水力较高,更好地维持了肌纤维结构	[43]
真空包装+生物保鲜液+微冻	用0.22 g/L茶多酚、5.00 g/L壳聚糖、0.35 g/L乳酸链球菌素复配的生物保鲜液处理鲭鱼,再采用真空包装于-4°C下微冻贮藏	鲭鱼的感官评价价值较高,在7 d内仍处于二级鲜度,与对照相比其货架期延长了3~4 d	[44]
真空包装+复配保鲜剂+超高压技术	采用质量分数0.049%的乳酸链球菌素、质量分数0.207%的D-异抗坏血酸钠、质量分数0.029%的迷迭香提取物处理预调理猪肉馅,再采用真空包装后进行超高压处理,于4°C下冷藏	作用压力为207 MPa,时间为15 min,可延缓色度劣变,延长保质期至14 d	[45]
真空包装+电子束辐照+冷藏	用2 kGy不同剂量率的电子束辐照处理真空包装冷鲜牛肉,并在2°C下冷藏15 d	2 500 Gy/s处理的效果最佳,在贮藏15 d后其细菌总数为5.161 lg(CFU/g),TVB-N值为16.6 mg/100 g, TBARS值为0.218 mg/100 g	[46]

货架期的目的^[47]。将气调包装应用于冷鲜肉保鲜, 首先解决的问题就是找到最佳的气体配比, 在延长肉类货架期的同时, 可较好地保持肉品的感官性状^[48]。尤其对于猪、牛、羊等新鲜红肉, 理论上应通过适当降低包装内的氧气含量, 以尽可能抑制好氧菌的生长繁殖, 或填充极低含量的一氧化碳, 以维持肉品的色泽。气调包装保鲜技术在国内外已有较多的文献报道, 主要包括通过测定理化、微生物、感官指标来表征肉品的品质变化和货架期, 并研究气调包装结合低温、辐照、超高压、紫外、臭氧、天然保鲜剂等处理方法, 以联合更多栅栏因子, 达到最佳的保鲜效果^[49-50]。如郭依萍等^[51]利用气调包装联合低温等离子体处理狮子头, 探究其品质及货架期的变化。试验结果表明, 二者的协同作用使得狮子头的初始菌落数减少了 0.70~1.56 lg(CFU/g); 经低温等离子体处理后, 新鲜狮子头中的庚醇、1-己醇、1-丙醇、2-癸酮及壬酸等挥发性有机化合物增加, 2-己酮、2-丁酮、苯乙烯、2-甲基吡嗪及八甲基三硅氧烷等挥发性有机化合物可能是狮子头腐败气味的主要成分; 采用 CO₂ (40%) + N₂ (60%) 气调包装协同低温等离子体处理 6 min, 其综合保鲜效果最好, 产品的货架期可达到 14 d。

在气调包装保鲜中, O₂ 与肌红蛋白结合, 并形成氧合肌红蛋白, 使得肉呈现鲜红色, 适当的 O₂ 含

量可抑制厌氧菌的生长, 同时赋予猪肉更佳的新鲜度, 但过高浓度的 O₂ 会造成肉品嫩度的下降^[52]。CO₂ 无毒、无味、成本低, 且对霉菌和多数需氧微生物具有较强的抑制作用, 但 CO₂ 会部分溶解于水和油脂中, 可能造成包装萎缩或肉品发酸等问题^[53]。N₂ 主要作为惰性填充气体, CO 可作为气调包装气体的组分, 可与肌红蛋白结合, 形成碳氧肌红蛋白 (MbCO), 可使肉呈现鲜亮的樱桃红色, 从而改善肉色, 同时还具有一定的抑菌效果^[54]。由于 CO 具有潜在毒性, 因此多数国家禁止在肉类包装中使用 CO^[55-56]。挪威肉类专家对气调包装肉品中使用的 CO 气体的毒性进行了检测, 结果表明, 含体积分数为 0.5%~1.0% 的 CO 的混合气体对消费者无任何危害。

国际上有关气调包装保鲜的应用较广泛, 包括果蔬、水产品和畜禽肉品等。20 世纪 70 年代, 生鲜肉气调包装在欧美国家已广泛应用。目前, 欧洲多数超市冷鲜肉的流通均采用高氧气调保藏技术^[57-58]。国内对生鲜肉气调包装的应用始于 20 世纪 80 年代, 从最初的单一气体保鲜逐步发展到多种气体混合保鲜, 取得了较多的研究成果。总体来看, 主要侧重于肉类保鲜效果、气调比例优化, 以及通过气调包装联合其他物理生物化学保鲜手段达到协同增效作用等方面。相关研究如表 3 所示。

表 3 肉品气调包装保鲜技术
Tab.3 Preservation technology of modified atmosphere packaging for meat products

包装材料	气体组合	保鲜效果
PP 材质包装盒 氯化聚丙烯 (chlorinated polypropylene, CPP) / 聚乙烯封口膜	A: 70% N ₂ +30% CO ₂ B: 70% O ₂ +30% CO ₂ C: 0.4% CO+69.6% CO ₂ +30% CO ₂ D: 真空包装	气调 C 组菌落总数最低, 色泽维持较好, 使冷鲜羊肉的保鲜期延长至 14 d ^[59]
PET+PA+PE 复合材料	A: 35% O ₂ +65% CO ₂ B: 35% O ₂ +35% CO ₂ +30% N ₂ C: 空气对照组	A 组包装的冷鲜猪肉抑菌效果和持水力更好, 色泽方面比 B 组更好 ^[60]
PP 包装盒 EVOH 共挤膜 PE 膜包裹 (对照)	A: 80% O ₂ +15% CO ₂ +5% N ₂ B: 75% O ₂ +20% CO ₂ +5% N ₂ C: 70% O ₂ +20% CO ₂ +10% N ₂ D: 65% O ₂ +25% CO ₂ +10% N ₂ E: 60% O ₂ +35% CO ₂ +5% N ₂	B 组为最佳气调组, 在此条件下包装的冷鲜猪肉具有良好的肉色, 货架期可延长至 18 d ^[58]
PE 保鲜袋	A: 100% CO ₂ B: 空气组	在贮藏 7 d 时, A 组冷藏草鱼的菌落总数和 TVB-N 值均在鲜度范围内, 空气组已达到腐败水平 ^[61]
MAP 组: EVOH 托盘+PET·SiO ₂ 涂层/ 尼龙 25/ CPP 封膜 MAP+中等电场处理组: 同上 对照组: PE 托盘+PE 封膜	A: 80% O ₂ +20% CO ₂ B: 空气对照组	高氧 MAP 结合中等电场处理可显著降低冷鲜猪肉的汁液流失和蒸煮损失, 延长鲜红期, 延长保质期 9 d。中等电场还能抑制高氧气氛引起的蛋白质氧化 ^[62]
PE 保鲜膜 PP 热成型盒	A: 72% O ₂ +28% CO ₂ B: 82% O ₂ +18% CO ₂ C: 80% N ₂ +20% O ₂ (对照)	A、B 组包装的冷鲜猪肉货架期延长了 4 d, 滴水损失明显降低, 肉色更好, 但 A、B 组的过氧化值相对较高 ^[63]

注: 表中的百分数均表示气体的体积分数。

2.3 智能包装

智能包装 (Intelligent Packaging, IP) 是在传统包装基础上, 融合生物、电子、传感器和物联网等先进技术, 能够实现多元智能功能 (如检测、传感、记录、跟踪、沟通等) 的包装系统。它不仅可以监测产品质量、跟踪关键点, 还可以提高产品的安全性, 预警可能出现的问题, 并在整个供应链中提供更详细的信息^[64]。智能包装系统通常包括以下组件: 指示器, 如时间-温度指示器、完整性或气体指示器、新鲜度指示器; 条码及射频识别, 如 RFID (Radio Frequency Identification) 标签; 传感器, 如生物传感器、气体传感器和荧光氧传感器^[65]。

2.3.1 指示器

指示器指通过特征变化 (通常是在颜色上) 来指示目标物质的存在与否或物质之间的反应程度的装置。气体指示器通常以标签或印制在包装薄膜上的形式出现, 它可以监测包装内气体成分的变化情况, 从而有助于监测产品的安全和质量。这些指示剂通过化学或酶促反应改变其颜色, 通常提供氧气或二氧化碳存在与否的信息。最常见的氧指示剂是基于氧结合反应、氧化还原反应或光激活氧化还原反应的颜色变化。Wen 等^[66]研发了一种可见比色氧指示剂, 可以准确识别完整的包装系统, 确保食品安全。该指示剂由载银二氧化钛纳米管 (Ag-titania nanotube, Ag-TNT)、甘油、亚甲基蓝和羟乙基纤维素 (hydroxyethyl cellulose, HEC) 组成。X 射线衍射、X 射线光电子能谱、透射电子显微镜、漫反射光谱等分析结果表明, Ag-TNT 具有高效的光催化性能, 比表面积从 85 m²/g 增至 227 m²/g, 带隙增加了 3.30 eV。这大大提高了 Ag-TNT 作为氧指示剂的性能。此外, 它还可以阻挡指示剂对自然光 (波长 > 380 nm) 的响应, 缩短指示剂活化时间, 这种氧气指示器可以大大提高封装无损检测的准确性。

新鲜度指标可用于反映包装食品品质的变化。通过微生物生长代谢物 (如葡萄糖、有机酸、乙醇、挥发性氮化合物、生物胺、二氧化碳、ATP 降解产物等) 来显示食品内部发生的变化, 以此判断产品的新鲜度。Ezati 等^[67]研究了一种实时监测牛肉末新鲜度的比色指标, 将茜素 (染料成分) 加入采用溶胶-凝胶法制备的纤维素-壳聚糖膜中, 并对其表征。在 pH 为 2~11 时, 该指示剂的颜色响应明显, 由黄色变为棕色或紫色, 在 4 °C 条件下其颜色稳定性优于在 25 °C 下。重要的是, 当总挥发性碱性氮 (TVB-N) 值达到临界量 (20.53 mg·N/100 g) 时, 该指标呈现由棕色到紫色的变化过程。由此可见, 基于茜素的纤维素-壳聚糖 pH 敏感指示剂能够通过感知颜色的变化来跟踪牛肉末在储存过程中的新鲜度。

指示剂类组件通过感知包装内外环境的变化, 通

常基于颜色反应来指示包装内气体成分的变化或肉品的新鲜程度, 从而提醒消费者。另外, 还有如时间-温度指示剂 (Time-Temperature indicator, TTi) 等已广泛应用于冷冻食品品质的监测, 但应注意指示剂智能包装的成本、制作工艺、指示精度, 以及是否对食品造成二次污染等问题。

2.3.2 传感器

传感器多数由 1 个感受器和 1 个转换器组成。受体将物理或化学信息转换为某种形式的能量, 然后经换能器将这种能量转换为有用的分析信号。该类组件主要包括生物传感器、气体传感器、荧光氧传感器等。生物传感器是将生物材料 (组织、微生物、细胞器、细胞受体、酶、抗体、核酸等) 与电子元件结合起来, 以获得可测量信号的探针^[68]。目前, 生物传感器常用于分析食物 (尤其是肉类) 的成分 (如蛋白质、碳水化合物、脂质、维生素、矿物质), 检测食品加工前后的有毒物质水平, 估计食物中叶酸、生物素、维生素 B12 和泛酸的含量 (替代微生物测定法), 评估食品中药物 (如抗生素和生长促进剂) 残留的数量。例如, GuardTM 就是一种含抗体的生物传感器, 可用于监测肉品中的大肠杆菌、沙门氏菌等病原体, 它可以印刷在聚乙烯基包装上, 当出现阳性反应时便可发出明显的提示信号^[69]。气体传感器通过改变传感器的物理参数, 对气体分析物的存在做出可逆和定量反应, 并由外部设备进行监测。Anusankari 等^[70]设计了一种便携式无创光学传感器, 它由荧光传感膜组成, 用于测量氧气和二氧化碳双重参数, 以评估各种肉类 (如羊肉、牛肉、猪肉、鱼和鸡肉等) 的新鲜度, 可将传感器膜附着在集成了光电子电路的密封容器内壁上。将新鲜或冷藏的样品采用双 CO₂/O₂ 传感器测试 8 h, 结果表明, 该传感器足够稳定, 可以监测腐烂肉类样品中排放的 CO₂。利用单片机对得到的响应进行标定, 并将结果显示在液晶显示屏上。未冷藏样品在 8 h 内释放 CO₂ 的质量浓度接近 4 g/L, 冷藏样品的质量浓度限值在 1 g/L 以内。结果表明, 所研制的光电双 O₂/CO₂ 传感器薄膜适用于家用肉类的新鲜度监测。

传感器的应用为肉类等易腐食品的品质监测提供了极大的便利, 但它也存在较多问题, 包括开发和生产成本较高、行业规范较严格、安全性较低, 以及目前食品企业需求相对有限等, 这些问题是它在食品行业广泛采用的主要障碍。

2.3.3 射频识别技术

射频识别 (RFID) 是一种新兴的无线通信技术, 它代表一种独立电子信息形式的智能包装, 它使用射频电磁场从附着在物体上的标签传输数据, 以实现产品的识别和可追溯性^[71]。它比其他检测识别技术更准确、更强大, 无需视觉接触即可读取, 不需要畅通的视线, 具有更宽的读数范围, 可在极端温度和不同压

力下工作, 可在 100 m 距离内被检测到。此外, 该系统可与 TTI 或生物传感器集成, 以收集时间-温度历史和微生物数据^[72]。该系统已用于易腐食品的温度监测。Shafiq 等^[73]设计了一种新型的无源 RFID 温度传感器, 用于监测冷链中食品、药品等易腐货物的周围环境温度。它可以随着温度的连续变化而自动调整其工作频率, 且能经历多次高/低温驱动循环, 可重复使用。Feng 等^[74]开发了一种全打印无芯片 RFID 传感器标签, 可用于监测湿度, 并研究了包括商业包装纸在内的 3 种纸基板的传感性能。该标签由 2 个平面电感-电容谐振器通过感应耦合无线工作, 纸张的使用提供了极佳的灵敏度和对湿度的合理响应时间。特别是廉价而坚固的包装纸, 在相对湿度 20%~70% 范围内显示出较大的灵敏度, 这为直接在传统包装上打印传感器标签提供了可能, 以超低的成本使包装“智能”。尽管 RFID 技术相对于条形码具有一些优势, 但在实际应用中也存在一些弱点, 这项技术普及缓慢的主要障碍是其高昂的成本。另外, 它从含有大量水分(如肉类食品)或金属的产品标签上读取信息较困难, 因为水分子可以吸收微波信号, 导致信号丢失, 金属可以反射这些信号。消费者信息的披露(例如购买习惯、行为)也是该系统广泛应用的另一障碍。尽管存在这些限制, 但是通过持续研究和开发 RFID 系统及降低其成本, 相信在不久的将来, 这项技术能够更广泛地应用于食品行业。

综上所述, 智能包装突破了传统包装体系的局限, 顺应了时代的发展。智能功能的实现离不开相应材料和技术的支撑, 只有充分了解智能原理、智能技术、智能方法及智能材料的性质, 并灵活运用整合到智能包装设计上, 增加智能包装的易用性和实用性, 才能设计出符合发展需求的智能包装。

3 分析与展望

当前用于肉品的包装材料多为传统塑料的多层复合, 大都不具备生物可降解性, 对环境造成了极大的污染。为了尽可能降低白色污染, 倡导环保理念, 实现包装的可持续发展, 开发安全、高效、可降解的环保材料具有重要的现实意义和社会价值。目前, 尚缺乏专门适用于畜禽肉品的包装材料(尤其针对猪、牛、羊等新鲜红肉), 来维持其良好的视觉新鲜度, 尽可能减少肉品的贮藏损失, 提升肉品包装的质量。未来可进一步研究 EHA/PE 材料、有机蒙脱土/超支化 PA6 纳米复合材料及 PA11/PVA/OMMT 高阻隔膜材料, 并结合气调包装技术用于畜禽新鲜红肉的保鲜。对于复配的可食性膜材, 由于加入了抗氧化剂、抗菌剂等活性成分, 因此可能影响包装肉品的食用安全性, 且其成膜方式也会影响产品的感官品质。在纳米复合包装中加入纳米填料, 其安全性还处于起步研

究阶段。

采用真空包装技术, 包装内压力的变化可能造成肉品色泽变差和汁液流失加重等, 而真空贴体包装的肉品持水力更好, 这可能是因贴体包装抑制了肉品的汁液外渗。产品采用气调包装虽不一定比采用真空包装的货架期长, 但可有效减少产品的贮藏损失, 且适宜的气体组合可维持肉品的色泽。故今后可继续研究气调包装与抗氧化、抗菌、除湿、纳米封装等活性包装技术的结合, 从而进一步延长气调包装肉品的货架期。

活性包装将传统包装的被动保护变为主动保护, 从而增加了包装的附加功能。虽然活性包装早在 30 多年前就被提出, 但目前市场上采用活性包装肉类食品相对较少, 在实际应用中还面临着诸多问题。例如, 活性物质释放后会迁移到肉品表面, 其迁移程度和毒性还未得到完全标准化的评估; 活性包装膜的破损可能会产生潜在的有害化学反应, 从而影响包装肉品的食用安全性; 精油类物质的添加会使肉品表面产生不良气味, 从而降低产品的感官品质; 活性包装的生产成本较高, 相关标准、法规也不完善, 消费者对其认可度还不高。活性包装不能及时监测并传递食品信息, 而智能包装正好弥补了这一缺点, 通过与传感、电子通信、互联网、生物等技术的融合, 使包装具备更加多元化的功能, 实现了消费者与产品的互动。目前, 我国智能包装技术尚处于起步研究阶段, 其发展还面临以下问题: 技术阻碍, 缺乏科研人才; 智能包装设备、材料及先进技术的使用, 导致其应用成本过高; 对食品品质的监测结果是否可靠有待进一步验证; 包装所用材料与食品接触是否会发生毒性迁移, 目前还缺少相关的测评方法; 国内缺乏权威性立法来确保智能包装的流通, 以及检测的安全性。尽管活性包装和智能包装还存在以上问题, 但是在人们越来越重视食品质量和安全的形势下, 其发展前景依然广阔, 未来活性包装必然会朝着安全、高效、健康的方向发展, 智能包装也会向着多元化、普及化、信息化方向迈进。

4 结语

肉品的贮藏保鲜已成为肉类行业发展不可忽视的问题, 究其本质是利用肉品中不同栅栏因子的协同或交互作用, 研究开发适用于肉品保鲜的栅栏技术(Hurdle Technology, HT), 延缓食品品质的劣变进程, 延长其保鲜期。有机结合不同技术手段, 以此来拓宽肉品保鲜的应用范围, 如智能包装与活性包装或气调包装的结合, 活性包装与可食膜的结合, 纳米技术与 RFID 技术的结合, 不同包装与低温贮藏方式(冷藏、冻藏、冰温贮藏、超冰温贮藏)的结合等。新型包装材料的开发与应用为肉品的贮藏运输提供了相

对安全、方便、低成本的保鲜方法。随着食品科技的发展,各类包装新技术会进一步完善和创新,新型技术和包装材料也会不断出现。

参考文献:

- [1] 李雪琴. 畜禽肉品在物流过程中持续保鲜对策研究[J]. 包装工程, 2020, 41(21): 158-164.
LI X Q. Sustainable Preservation of Livestock and Poultry Meat in Logistics Process[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(21): 158-164.
- [2] DEWEY-MATTIA D, MANIKONDA K, HALL A J, et al. Surveillance for Foodborne Disease Outbreaks - United States, 2009-2015[J]. Morbidity and Mortality Weekly Report Surveillance Summaries, 2018, 67(10): 1-11.
- [3] Anon. The European Union Summary Report on Trends and Sources of Zoonoses, Zoonotic Agents and Food-Borne Outbreaks in 2016[J]. EFSA Journal European Food Safety Authority, 2017, 15(12): e05077.
- [4] 李月明, 刘飞, 姜雪晶, 等. 生物可降解膜在肉品保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(6): 51-54.
LI Y M, LIU F, JIANG X J, et al. Application of Antibacterial Slow-Release Biodegradable Film in Meat Preservation: A Review[J]. Meat Research, 2017, 31(6): 51-54.
- [5] 赵珂, 焦文晓, 姜微波. 生鲜食品气调包装新型材料的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 341-346.
ZHAO K, JIAO W X, JIANG W B. Research Progress of New Materials in Modified Atmosphere Packing of Fresh Foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 341-346.
- [6] PETERSEN M K, NISSEN H, EIE T, et al. Effect of Packaging Materials and Storage Conditions on Bacterial Growth, Off-Odour, pH and Colour in Chicken Breast Fillets[J]. Packaging Technology and Science, 2004, 17(3): 165-174.
- [7] 呼和, 梁晓红, 王羽, 等. EHA/PE 薄膜的阻隔性及其在冷鲜肉包装中的应用[J]. 塑料工业, 2015, 43(6): 66-69.
HU H, LIANG X H, WANG Y, et al. The Barrier Property of EHA/PE Film and Its Application to Chilled Meat Packing[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(6): 66-69.
- [8] 王维婷, 王守经, 肖欣欣, 等. 新型高阻隔气调包装膜对冷鲜羊肉的保鲜作用研究[J]. 肉类工业, 2018(12): 37-41.
WANG W T, WANG S J, XIAO X X, et al. Study on the Preservation Effect of New High Barrier Modified Atmosphere Packaging Membrane on Chilled Mutton[J]. Meat Industry, 2018(12): 37-41.
- [9] 邢明, 罗亚明. 食品纳米包装与防伪技术综合应用的探究[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 182-184.
XING M, LUO Y M. Research of Synthetic Application of Nano-Packaging and Anti-Counterfeiting Technologies[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 182-184.
- [10] 韩永生, 聂柳慧. 纳米二氧化钛保鲜薄膜的保鲜机理和制备[J]. 株洲工学院学报, 2004, 18(5): 148-150.
HAN Y S, NIE L H. The Mechanism of Protecting Fresh and Preparation of Nano-TiO₂ Thin Film[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2004, 18(5): 148-150.
- [11] 陈希荣. 新型包装材料中应用的纳米技术[J]. 包装工程, 2003, 24(6): 4-8.
CHEN X R. Applied Nano Technology in the Material of New Type Packaging[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 4-8.
- [12] 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 Packaging Material in Fruit and Vegetable Fresh-Keeping[J]. Food Science, 2008, 29(12): 766-768.
- [13] 徐晓娟. 食品与药品包装中的纳米技术[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 191-194.
XU X J. Nanometer Technology in Food and Pharmaceutical Packaging[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 191-194.
- [14] AMNA T, YANG J, RYU K S, et al. Electrospun Antimicrobial Hybrid Mats: Innovative Packaging Material for Meat and Meat-Products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(7): 4600-4606.
- [15] 李世杰. 蒙脱土/超支化 PA6 纳米复合包装材料的制备及其性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019: 1-52.
LI S J. Preparation and Properties of Montmorillonite/Hyperbranched PA6 Nanocomposites for Packaging[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2019: 1-52.
- [16] 李潇潇, 徐晓晴, 闫昀, 等. PEG200 增塑改性 ACNs/MMT/PHBH 纳米复合包装膜[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 91-98.
LI X X, XU X Q, YAN X, et al. PEG200 Plasticized and Modified ACNs/MMT/PHBH Nanocomposite Packaging Films[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(7): 91-98.
- [17] 许超群, 梁旭茹, 岳淑丽, 等. 基于果蔬保鲜的活性

- 包装技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 305-310.
- XU C Q, LIANG X R, YUE S L, et al. Research Progress of Active Packaging Technology on Fruit and Vegetable Preservation[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(16): 305-310.
- [18] 姜尚洁, 黄俊彦. 现代食品包装新技术——活性包装[J]. 包装工程, 2015, 36(21): 150-154.
- JIANG S J, HUANG J Y. New Technology of Modern Food Packaging—Active Packaging[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21): 150-154.
- [19] 李墨琳, 罗欣, 刘国星, 等. 活性包装对肉制品品质及货架期影响的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 313-320.
- LI M L, LUO X, LIU G X, et al. A Review of Current Research on the Effect of Active Packaging on the Quality and Shelf-Life of Meat Products[J]. Food Science, 2019, 40(11): 313-320.
- [20] ŠČETAR M, KUREK M, GALIĆ K T. Trends in Meat and Meat Products Packaging – a Review[J]. Croatian Journal of Food Science and Technology, 2010, 2(1): 32-48.
- [21] 卢唱唱, 许琦场, 徐丹. 蒙脱土对纤维素基吸湿衬垫结构与性能的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 6-10.
- LU C C, XU Q Y, XU D. Effects of Montmorillonite Addition on the Structure and Properties of CMC-Na/CS Sponge Absorbent Pad[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 6-10.
- [22] YILDIRIM S, RÖCKER B, PETTERSEN M K, et al. Active Packaging Applications for Food[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(1): 165-199.
- [23] YANG H J, LEE J H, WON M, et al. Antioxidant Activities of Distiller Dried Grains with Solubles as Protein Films Containing Tea Extracts and Their Application in the Packaging of Pork Meat[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 174-179.
- [24] 蔡月, 王梦军, 年琳玉, 等. 茶多酚@沸石咪唑酯骨架材料/壳聚糖/海藻酸钠活性包装膜的制备及表征[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 272-281.
- CAI Y, WANG M J, NIAN L Y, et al. Preparation and Characterization of Tea Polyphenols @ Zeolitic Imidazolate Framework-8/Chitosan/Sodium Alginate Active Packaging Film[J]. Food Science, 2022, 43(17): 272-281.
- [25] 代丹丹. 尼龙 11/聚乙烯醇/有机蒙脱土共混材料阻隔膜与活性包装系统设计研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2021: 1-46.
- DAI D D. Investigation and Design for the Nylon 11/Poly(vinyl alcohol)/Organic Montmorillonite Films and Their Active Packaging System[D]. Wuhan: Hubei University, 2021: 1-46.
- [26] GANIARI S, CHOULITOU DI E, OREOPOULOU V. Edible and Active Films and Coatings as Carriers of Natural Antioxidants for Lipid Food[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 68: 70-82.
- [27] DEGHANI S, HOSSEINI S V, REGENSTEIN J M. Edible Films and Coatings in Seafood Preservation: A Review[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 505-513.
- [28] 严碧云, 李西, 黄爱妮, 等. 壳聚糖蒜姜复合膜在冷却猪肉保鲜中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(12): 72-81.
- YAN B Y, LI X, HUANG A N, et al. Application of Chitosan Ginger Garlic Composite Film in Chilled Pork Preservation[J]. China Food Additives, 2021, 32(12): 72-81.
- [29] 徐鑫, 吴平华, 徐幸莲. 青钱柳提取物复合可食膜对猪肉微冻的保鲜效果[J]. 枣庄学院学报, 2020, 37(5): 73-82.
- XU X, WU P H, XU X L. Fresh Preserving Effect of Combined Edible Film of Cyclocarya paliurus Extract on Pork Superchilling[J]. Journal of Zaozhuang University, 2020, 37(5): 73-82.
- [30] 郭智臣. 新型可降解包装材料助力塑料包装行业绿色转型[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2016, 14(6): 90.
- GUO Z C. New Degradable Packaging Materials Help the Green Transformation of Plastic Packaging Industry[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2016, 14(6): 90.
- [31] 梁政, 王克俭. 绿色塑料包装技术研究及新型环保材料 XPE 在包装上应用[J]. 塑料包装, 2021, 31(1): 10-14.
- LIANG Z, WANG K J. Research on Green Plastic Packaging Technology and Application of New Environmental Protection Material XPE in Packaging[J]. Plastics Packaging, 2021, 31(1): 10-14.
- [32] 张晓燕, 云雪艳, 梁敏, 等. 含有海藻糖的生物可降解薄膜对冷鲜肉的保鲜与护色作用[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 298-304.
- ZHANG X Y, YUN X Y, LIANG M, et al. Influence of Biodegradable Film Containing Trehalose on Fresh-Keeping and Colour Protection of Chilled Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8): 298-304.
- [33] 张玉琴, 梁敏, 齐小晶, 等. 高阻隔性可降解抑菌薄膜的制备及其在冷鲜肉中的应用[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 140-146.

- ZHANG Y Q, LIANG M, QI X J, et al. Preparation of Antibacterial Biodegradable Film and Effect of the Film on Quality of Chilled Meat[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(2): 140-146.
- [34] 姜艳. 冷却肉栅栏保鲜技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016: 1-7.
- JIANG Y. Application of Hurdle Technology in the Preservation Technology of Chilled Meat[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016: 1-7.
- [35] 姚倩儒, 陈历水, 李慧, 等. 冷鲜肉保鲜包装技术现状和发展趋势[J]. *包装工程*, 2021, 42(9): 194-200.
- YAO Q R, CHEN L S, LI H, et al. Current Situation and Development Trend of Packaging Technology for Chilled Fresh Meat[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(9): 194-200.
- [36] 熊焰. “希悦尔”真空收缩包装的高阻隔性和高收缩性为中国的肉类产品带来绿色创新[J]. *塑料包装*, 2014, 24(2): 28-30.
- XIONG Y. The High Barrier and Shrink Performance of Sealed Air's Vacuum Shrink Bag Brings Green Innovation to Chinese Meat Products[J]. *Plastics Packaging*, 2014, 24(2): 28-30.
- [37] 王淑慧. 基于异形包装件的多腔式薄膜热成型技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017: 1-5.
- WANG S H. Research on Multi-Cavity Thermoforming by Film of Irregular Package[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017: 1-5.
- [38] 彭润玲, 谢元华, 张志军, 等. 真空包装的现状与发展趋势[J]. *真空*, 2019, 56(2): 1-15.
- PENG R L, XIE Y H, ZHANG Z J, et al. Present Situation and Development Trend of Vacuum Packaging[J]. *Vacuum*, 2019, 56(2): 1-15.
- [39] 马雪飞, 杜志龙, 马季威, 等. 食品用贴体包装技术及设备研究进展[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(5): 102-107.
- MA X F, DU Z L, MA J W, et al. Research Progress of Skin Packaging Technology and Equipment for Food[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(5): 102-107.
- [40] 秦凤贤, 胡铁军, 闫晓侠, 等. 不同包装方式对冷鲜鹿肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2014, 28(5): 33-36.
- QIN F X, HU T J, YAN X X, et al. Effects of Different Packaging Methods on Quality of Chilled Deer Meat[J]. *Meat Research*, 2014, 28(5): 33-36.
- [41] PENNACCHIA C, ERCOLINI D, VILLANI F. Spoilage-Related Microbiota Associated with Chilled Beef Stored in Air or Vacuum Pack[J]. *Food Microbiology*, 2011, 28(1): 84-93.
- [42] 黄晓红. 抗冻剂结合包装方式对猪肉微冻贮藏过程中品质影响的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022: 14-69.
- HUANG X H. Effects of Cryoprotectants Combined with Packing Methods on Pork Quality during Superchilling Storage[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2022: 14-69.
- [43] 徐赵萌, 王明, 丁洁, 等. 复合调味料对真空包装海鲈鱼片的保鲜性能[J]. *中国调味品*, 2022, 47(8): 106-110.
- XU Z M, WANG M, DING J, et al. The Preservation Properties of Compound Seasoning on Vacuum Packed Lateolabrax Japonicas Fillets[J]. *China Condiment*, 2022, 47(8): 106-110.
- [44] 欧阳锐, 王志辉, 李立鹏, 等. 生物保鲜液结合真空包装对鲭鱼保鲜的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(11): 141-144.
- OUYANG R, WANG Z H, LI L P, et al. Effects of Bio-Preservation Liquid Combined with Vacuum Packaging on the Preservation of Mackerel[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(11): 141-144.
- [45] 丁一丹. 真空包装预调理猪肉馅保鲜技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021: 1-64.
- DING Y D. Study on Preservation Technology of Vacuum Packaging Pre Conditioning Pork Stuffing[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021: 1-64.
- [46] 王宁, 王晓拓, 王志东, 等. 电子束辐照剂量率对真空包装冷鲜牛肉品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(7): 241-247.
- WANG N, WANG X T, WANG Z D, et al. Effect of Electron Beam Irradiation Dose on the Quality of Vacuum-Packaged Chilled Fresh Beef[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 31(7): 241-247.
- [47] 杨鸿博, 杨啸吟, 张一敏, 等. 包装方式对牛排贮藏期间微生物数量和演替的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(13): 166-173.
- YANG H B, YANG X Y, ZHANG Y M, et al. Effect of Packaging Atmospheres on Microbial Counts and Succession in Beef Steaks during Storage[J]. *Food Science*, 2021, 42(13): 166-173.
- [48] 杨啸吟, 罗欣, 梁荣蓉. 气调包装冷却肉品质和货架期的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(7): 158-164.
- YANG X Y, LUO X, LIANG R R. Current Research on the Quality and Shelf-Life of MAP Preservation Chilled Meat[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(7): 158-164.
- [49] 刘梦竹, 魏琦麟, 向蓉, 等. 鸡肉低温储藏保鲜技术

- 研究进展[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(3): 104-110.
- LIU M Z, WEI Q L, XIANG R, et al. Research Progress on Techniques of Chicken Cryopreservation[J]. Storage and Process, 2022, 22(3): 104-110.
- [50] 赵春侠. 一氧化碳气调包装技术对冷却肉抑菌护色效果的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008: 1-50.
- ZHAO C X. Antimicrobial Activity and Color Protection CO-Modified Atmosphere Packaging in Chilled Pork[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008: 1-50.
- [51] 郭依萍, 李冉, 叶可萍, 等. 气调包装协同低温等离子体杀菌对狮子头保鲜效果的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1815-1825.
- GUO Y P, LI R, YE K P, et al. Effect of Modified Atmosphere Packaging-Cold Plasma Sterilization on the Preservation of Meatballs[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(9): 1815-1825.
- [52] 陈东杰, 李向阳, 张玉华, 等. 不同包装条件下冷却肉品质变化及腐败菌相研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(13): 281-285.
- CHEN D J, LI X Y, ZHANG Y H, et al. Effect of Different Packaging on the Quality and Dominant Spoilage Bacteria of Chill Pork during Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(13): 281-285.
- [53] 林顿. 猪肉微冻气调包装保鲜技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 28-50.
- LIN D. Study on Superchilling Preservation Combined with Modified Atmosphere Packaging of Pork[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 28-50.
- [54] JAYASINGH P, CORNFORTH D P, CARPENTER C E, et al. Evaluation of Carbon Monoxide Treatment in Modified Atmosphere Packaging or Vacuum Packaging to Increase Color Stability of Fresh Beef[J]. Meat Science, 2001, 59(3): 317-324.
- [55] DJENANE D, RONCALÉS P. Carbon Monoxide in Meat and Fish Packaging: Advantages and Limits[J]. Foods, 2018, 7(2): 12.
- [56] GREBITUS C, JENSEN H H, ROOSEN J, et al. Fresh Meat Packaging: Consumer Acceptance of Modified Atmosphere Packaging Including Carbon Monoxide[J]. Journal of Food Protection, 2013, 76(1): 99-107.
- [57] 李素, 赵冰, 张顺亮, 等. 高氧及 CO₂ 气调包装对冷却猪肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2016, 30(11): 16-21.
- LI S, ZHAO B, ZHANG S L, et al. Effects of High Oxygen and Carbon Dioxide Modified Atmosphere Packaging on the Quality of Chilled Pork[J]. Meat Research, 2016, 30(11): 16-21.
- [58] 杨梦达, 伍军. 高氧气调包装对冷却猪肉保鲜效果的影响[J]. 北京农学院学报, 2017, 32(2): 71-74.
- YANG M D, WU J. The Impact of High-Oxygen Modified Atmosphere Packaging on Chilled Pork Preservation[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2017, 32(2): 71-74.
- [59] 周立, 张锐, 王卫, 等. 不同气调包装对冷却羊肉保鲜效果研究[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 1-9.
- ZHOU L, ZHANG R, WANG W, et al. Effects of Different Modified Atmospheres Packaging on Preservation of Mutton in Chilled Storage[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(21): 1-9.
- [60] 杨江, 曾钰滢, 熊哲民, 等. 恩施黑猪生鲜肉气调保鲜技术及其贮藏品质的研究[J]. 肉类工业, 2021(9): 18-23.
- YANG J, ZENG S H, XIONG Z M, et al. Study on Modified Atmosphere Preservation Technology of Fresh Meat of Enshi Black Pig and Its Storage Quality[J]. Meat Industry, 2021(9): 18-23.
- [61] 程智蓁, 张双其, 杨庆伦, 等. 高浓度 CO₂ 气调包装对冷藏草鱼品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(12): 196-201.
- CHENG Z Z, ZHANG S Q, YANG Q L, et al. Effect of High Carbon Dioxide Modified Atmosphere Packaging(MAP) on the Quality of Grass Carp(Ctenopharyngodon Idellus) during Refrigerated Storage[J]. The Food Industry, 2021, 42(12): 196-201.
- [62] HU H H, ZHANG L, LU L L, et al. Effects of the Combination of Moderate Electric Field and High-Oxygen Modified Atmosphere Packaging on Pork Meat Quality during Chill Storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(1): 2-9.
- [63] 张福生, 黄晶晶, 鄢嫣, 等. 高氧气调包装对安徽品种猪肉低温贮藏期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 198-203.
- ZHANG F S, HUANG J J, YAN Y, et al. Effect of High Oxygen Modified Atmosphere Packaging on Quality of Pork from Wei Pig Breeds in Anhui Stored at Chilling Temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 198-203.
- [64] 陈芳锐, 蒋志辉, 王访平, 等. 智能包装的发展应用及其前景[J]. 中国包装, 2022, 42(5): 10-16.
- CHEN F R, JIANG Z H, WANG F P, et al. Development, Application and Prospect of Intelligent Packaging[J]. China Packaging, 2022, 42(5): 10-16.
- [65] LEE S J, MIJANUR RAHMAN A T M. Intelligent Packaging for Food Products[J]. Innovations in Food Packaging: Second Edition, 2013: 171-209.
- [66] WEN J W, HUANG S T, JIA L, et al. Visible Colorime-

- tric Oxygen Indicator Based on Ag-Loaded TiO₂ Nanotubes for Quick Response and Real-Time Monitoring of the Integrity of Modified Atmosphere Packaging[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(9): 1-7.
- [67] EZATI P, TAJIK H, MORADI M. Fabrication and Characterization of Alizarin Colorimetric Indicator Based on Cellulose-Chitosan to Monitor the Freshness of Minced Beef[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 285: 519-528.
- [68] YAM K L, TAKHISTOV P T, MILTZ J. Intelligent Packaging: Concepts and Applications[J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(1): R1-R10.
- [69] 王长安, 陈杰, 陈玉婷, 等. 活性-智能包装在肉类工业中的应用进展[J]. *包装工程*, 2017, 38(9): 130-134.
WANG C A, CHEN J, CHEN Y T, et al. Advances of Active and Intelligent Packaging Applications in Meat Industry[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(9): 130-134.
- [70] ANUSANKARI S, BALAJI GANESH A, SUBASRI R, et al. Optical Determination of Carbon Dioxide and Oxygen by a Fluorescent Membrane to Evaluate the Freshness of Meat Products[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2019, 47(6): 640-665.
- [71] ABAD E, PALACIO F, NUIN M, et al. RFID Smart Tag for Traceability and Cold Chain Monitoring of Foods: Demonstration in an Intercontinental Fresh Fish Logistic Chain[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(4): 394-399.
- [72] WANT R. RFID: A Key to Automating everything[J]. *Scientific American*, 2004, 290(1): 56-65.
- [73] SHAFIQ Y, GIBSON J S, KIM H, et al. A Reusable Battery-Free RFID Temperature Sensor[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(10): 6612-6626.
- [74] FENG Y, XIE L, CHEN Q, et al. Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packaging[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(6): 3201-3208.