

高敬瑶, 吕辛梦, 周志, 等. 非热物理技术及天然抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 405–414. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040140

GAO Jingyao, LÜ Xinmeng, ZHOU Zhi, et al. Research Progress on the Application of Non-thermophysical Technology and Natural Antibacterial Agents on the Preservation of Chilled Livestock and Poultry Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 405–414. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040140

· 专题综述 ·

# 非热物理技术及天然抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的应用研究进展

高敬瑶<sup>1,2</sup>, 吕辛梦<sup>1,2</sup>, 周志<sup>1,\*</sup>, 熊光权<sup>2</sup>, 汪兰<sup>2</sup>, 吴文锦<sup>2</sup>, 石柳<sup>2,\*</sup>, 刘斌<sup>3</sup>, 黄云<sup>4</sup>,  
钟雪芬<sup>5</sup>, 钱磊明<sup>5</sup>

(1.湖北民族大学生物与食品工程学院, 湖北恩施 445000;

2.农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所,  
湖北武汉 430064;

3.宣恩县万寨乡农业技术服务中心, 湖北恩施 445000;

4.湖北华醇食品有限公司, 湖北荆门 420800;

5.荆门市掇刀区畜牧兽医局, 湖北荆门 420800)

**摘要:**2023 年我国畜禽肉产量达 2456 万吨, 具有很大的消费市场, 但其易腐败, 保质期短, 严重影响其经济价值。目前, 非热物理技术及天然抗菌剂是冷鲜畜禽肉制品保鲜的研究热点。本文综述了非热物理技术(气调包装、辐照、高压电场和冰温)和天然抗菌剂(植物源、动物源和微生物源)的抑菌机理, 及在冷鲜畜禽肉制品中的应用情况, 重点阐述了综合保鲜技术对冷鲜畜禽肉制品的保鲜应用效果, 并对智能保鲜在冷鲜畜禽肉制品的应用做出展望, 以期为非热物理技术及天然抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品中的保鲜提供可行性参考。

**关键词:**冷鲜畜禽肉制品, 非热物理技术, 天然抗菌剂, 联合技术, 保鲜

中图分类号:TS251.5

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2025)07-0405-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040140



本文网刊:

## Research Progress on the Application of Non-thermophysical Technology and Natural Antibacterial Agents on the Preservation of Chilled Livestock and Poultry Meat Products

GAO Jingyao<sup>1,2</sup>, LÜ Xinmeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhi<sup>1,\*</sup>, XIONG Guangquan<sup>2</sup>, WANG Lan<sup>2</sup>, WU Wenjin<sup>2</sup>, SHI Liu<sup>2,\*</sup>,  
LIU Bin<sup>3</sup>, HUANG Yun<sup>4</sup>, ZHONG Xuefen<sup>5</sup>, QIAN Leiming<sup>5</sup>

(1.College of Biological and Food Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China;

2.Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-products Processing and Nuclear Agricultural Technology,  
Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Hubei Academy of Agricultural Sciences,  
Wuhan 430064, China;

3.Agricultural Technology Service Center of Wanzhai Township, Xuanen County, Enshi 445000, China;

4.Hubei Huachun Food Co., Ltd., Jingmen 420800, China;

5.Animal Husbandry and Veterinary Bureau, Duodao District, Jingmen 420800, China)

**Abstract:** In 2023, the production of chilled livestock and poultry meat have reached 0.2456 million tons in China, with a

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 2023 年湖北省农业事业创新发展补助资金项目。

作者简介: 高敬瑶 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1132472882@qq.com。

\* 通信作者: 周志 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: 542115971@qq.com。

石柳 (1988-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: shiliu@hbaas.com。

large consumer market. However, easy to corruption and limited shelf life has led to the serious economic loss of chilled livestock and poultry meat products. Currently, non-thermophysical technology and natural antimicrobial agents are the research hotspots for the preservation of chilled livestock and poultry meat products. This paper reviews the mechanisms of bacterial inhibition by non-thermophysical techniques (modified atmosphere packaging, irradiation, high voltage electric field and ice temperature) and natural antimicrobial agents (with plant, animal and microbial sources), and their application on the preservation of chilled livestock and poultry meat products. Moreover, this work elaborates the application of combination of non-thermophysical technology and natural antimicrobial agents, and making an outlook on the application of intelligent preservation in chilled livestock and poultry meat products. This work can provide feasible references for the preservation of non-thermophysical technology and natural antimicrobial agents in chilled livestock and poultry meat products.

**Key words:** chilled livestock and poultry meat products; non-thermophysical techniques; natural antibacterial agents; combined technology; preservation

畜禽肉类包括猪、牛、羊、鸡、鸭、鹅等,含有人体日常生活中所需的必需氨基酸、矿物质和维生素等<sup>[1]</sup>。据 2023 年肉类产量报告,畜禽肉产量 2456 万吨,同比增长 2.5%<sup>[2]</sup>,具有很大的消费市场。冷鲜肉是指屠宰后肉胴体温度在 24 h 内降低到 0~4 ℃ 的迅速冷却处理,并在加工、运输和销售过程中保持 0~4 ℃<sup>[3]</sup>,是畜禽肉售卖的主要形式,保质期约 7 d,存在货架期短的问题<sup>[4]</sup>。食品货架期受水分活度、湿度、温度和微生物等因素的影响<sup>[5]</sup>。其中,微生物污染是冷鲜畜禽肉制品内源性腐败变质的主要原因,影响肉制品安全、营养和风味<sup>[6-7]</sup>。通常,非热物理技术、化学抑菌剂和天然抑菌剂是冷鲜畜禽肉制品抑制微生物繁殖的主要方式。随着对食品安全、健康的要求不断提高,化学抑菌剂已不能满足消费者的需求,而非热物理技术和天然抑菌剂具有安全、健康、成本低、效果明显和操作简便等优点<sup>[8]</sup>,受到越来越多的关注。

目前,关于非热物理技术及天然抗菌剂在食品保鲜应用中的研究越来越多,但对这两种方式及联合使用在冷鲜畜禽肉制品中的应用还未进行综合报道。因此,本文综述了非热物理技术及天然抗菌剂对冷鲜畜禽肉制品保鲜效果的影响(图 1),为畜禽肉制品储藏保鲜提供理论基础。

## 1 非热物理技术在冷鲜畜禽肉制品中的应用

气调包装、辐照、高压电场和冰温贮藏是目前在冷鲜畜禽肉制品中常用的非热物理保鲜技术,具有杀菌效果好、效率高、简便操作的优点,在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的应用见表 1。

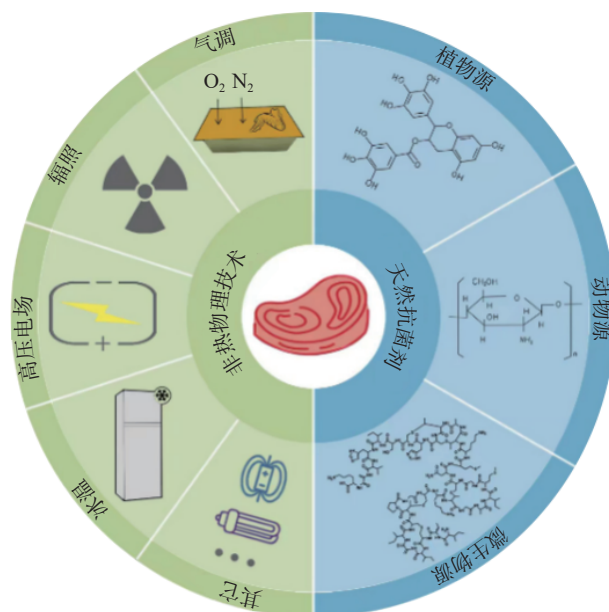


图 1 非热物理技术及天然抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品中的应用

Fig.1 Non-thermophysical techniques of natural antibacterial agents for the preservation of chilled livestock and poultry meat products

### 1.1 气调包装在冷鲜畜禽肉制品中的应用

气调包装(MAP)通过改变包装内肉制品周围的气体组成成分,有效抑制微生物的生长和代谢,减少脂质氧化,可最大限度提高食品的营养价值和风味,延长货架期,且具有低成本、加工简便和节能等优点。目前,冷鲜畜禽肉制品保鲜中常用的 MAP 气体有氮气(N<sub>2</sub>)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和氧气(O<sub>2</sub>),通过降低包装中 O<sub>2</sub> 浓度,抑制需氧菌的呼吸速率和生长

表 1 非热物理技术在冷鲜畜禽肉制品中的应用

Table 1 Application of non-thermophysical techniques in chilled livestock and poultry meat products

| 非热物理技术   | 包装食品 | 应用效果                                                                                 | 参考文献 |
|----------|------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 伽马辐照     | 鸡肉   | 辐照能减少冷藏鸡肉微生物数量(7.23~1.56 lg CFU/g),并延长保质期至60 d                                       | [9]  |
| 电子束辐照    | 鸭肉   | 在冷藏温度下,辐照灭菌将肉的保质期延长至17 d,并保持肉的感官特性                                                   | [10] |
| 电子束辐照、气调 | 卤鸭   | 电子束辐照和MAP(40% CO <sub>2</sub> 和60% N <sub>2</sub> )能保持鸭脖的理化稳定性,抑制魏氏菌属生长,并将货架期延长至30 d | [11] |
| 高压静电场    | 牛肉   | HVEF处理会增加牛肉风味物质含量、改变真菌和细菌优势菌的比例,对发酵牛肉品质提升有较好促进作用                                     | [12] |
| 冰温贮藏     | 牛肉   | 采用(-1.0±0.5) ℃冰温保鲜牛肉,保质期延长至12 d,比4 ℃保鲜延长5 d以上                                        | [13] |

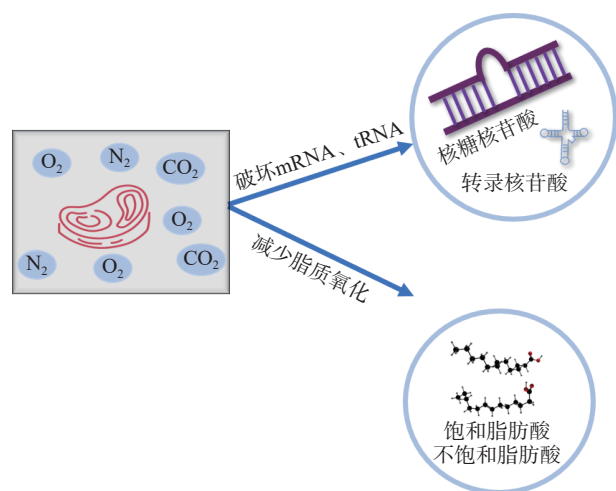


图 2 冷鲜畜禽肉制品利用气调包装保鲜抑菌机理

Fig.2 Chilled livestock and poultry meat products using atmosphere packaging preservation antibacterial mechanism

(图 2)<sup>[14]</sup>。使用 30% CO<sub>2</sub> 和 70% N<sub>2</sub> MAP 在冷鲜鸡肉的贮藏期内显著抑制假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.), 延长储藏期至 31 d<sup>[15]</sup>; 使用 25% CO<sub>2</sub> 和 35% N<sub>2</sub> 的 MAP 对冷鲜无骨牛肉进行保鲜处理, 可更好地抑制无骨牛肉中假单胞菌属、乳杆菌属(*Lactobacillus*)和肉杆菌属(*Carnobacterium*)<sup>[16]</sup>。因此, 在采用 MAP 时应充分考虑冷鲜畜禽肉制品中的优势腐败菌, 以确定适宜的 MAP 气体成分。

虽然 MAP 对冷鲜畜禽肉制品有保鲜效果, 但 MAP 中微生物种类会影响抑菌效果<sup>[11]</sup>, 因此采用改性包装膜和其他方式联合处理可提高保鲜效果, 改性聚醚醚酮包装膜、新型聚乙烯包装膜和生物保鲜剂联合 MAP 等, 可通过物理改性、化学改性, 有效改善聚醚醚酮(PEEK)基气调包装膜的稳定性、透气性和抗菌性等性能<sup>[17-19]</sup>。冰温联合 15% O<sub>2</sub>+30% CO<sub>2</sub>+55% N<sub>2</sub> MAP 包装鸡肉, 与对照组相比菌落总数降低了约 2 个对数周期, 有效延长鸡肉的保鲜期<sup>[20]</sup>。在冷鲜畜禽肉制品保鲜中利用联合技术可提高 MAP 的抗菌性, 使保鲜效果更优。

## 1.2 辐照杀菌在冷鲜畜禽肉制品中的应用

辐照(irradiation)技术是通过 X 射线、γ 射线和电子束等方式灭菌的一种非热物理保鲜技术, 通过两种作用杀灭微生物, 直接作用是射线破坏微生物、细菌、病毒或微小虫类的 DNA、RNA、脂质和蛋白质等物质<sup>[21]</sup>; 间接作用是使水分子辐解, 与生物大分子发生氧化还原反应, 破坏微生物结构和功能<sup>[22]</sup>, 导致微生物不能正常生长繁殖, 达到控制微生物和预防食品腐败的目的(图 3)。与传统食品灭菌方式相比, 辐照杀菌具有射线穿透力强、杀菌效果好、无残留、操作简单、安全环保和节约能源的优势。8 kGy 低能电子束显著抑制了冷鲜牛排中微生物的生长, 21 d 时牛肉中微生物仅为 3.95 log CFU/g<sup>[23]</sup>。

虽然辐照可显著杀灭冷鲜畜禽肉制品中的微生物, 但存在色泽改变、脂质和蛋白质氧化、产生异味

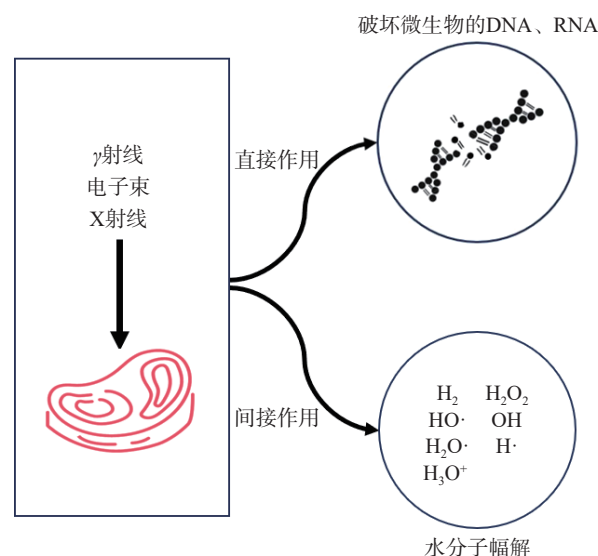


图 3 冷鲜畜禽肉制品利用辐照保鲜抑菌机理

Fig.3 Chilled livestock and poultry meat products using irradiation preservation antibacterial mechanism

等不良影响, 可通过降低辐照剂量或联合其他技术缓解色泽、质地、风味等劣变, 如天然抗氧化剂、冰温和 MAP<sup>[24]</sup>。辐照联合冰温贮藏可以改善肉色, 延缓褐变, 抑制肉食杆菌属(*Carnobacterium*)和乳杆菌属(*Lactobacillus*)等微生物生长, 冰温贮藏 30 d, 8 kGy 处理组的菌落总数均低于 5 lg CFU/g, 处于新鲜水平<sup>[25]</sup>。因此, 辐照技术常与其他技术联用, 以实现冷鲜畜禽肉制品的保鲜与品质保持。

## 1.3 高压电场在冷鲜畜禽肉制品中的应用

高压电场技术是一种耗时短、无辐射、无污染、低耗能的非热物理杀菌技术。在外加电场作用下, 肉周围的介质产生离子和光电与腐败微生物表面接触, 细胞膜逐渐变薄, 细胞崩解死亡, 从而达到杀菌的目的(图 4)。高压静电场(HVEF)和高压脉冲电场(PEF)是目前食品中最常用的技术<sup>[26-27]</sup>, 主要在果蔬、饮料中应用广泛, 但在冷鲜畜禽肉制品保鲜中应用较少, 主要是减少肉制品中的革兰氏阴性菌<sup>[28-29]</sup>, 此外, 还未有关于 PEF 保鲜冷鲜畜禽肉制品的应用。由于微生物对电场技术的易感性不同, 所以 HVEF 技术对于微生物抑制均存在一定的局限性, 单一使用较难达到预期效果, 可与其他技术联合使用<sup>[30]</sup>。

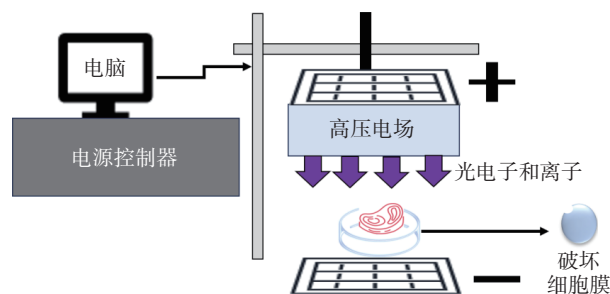


图 4 冷鲜畜禽肉制品利用高压电场保鲜抑菌机理

Fig.4 Chilled livestock and poultry meat products using high-voltage electric field preservation antibacterial mechanism

通过 35 kV、15 min HVEF 处理冰温( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )条件下储藏的猪肉,可抑制假单胞菌(*Pseudomonas* spp.)生长<sup>[31]</sup>。因此,高压电场的应用范围和效果仍有待进一步扩大。

#### 1.4 冰温在冷鲜畜禽肉制品中的应用

冰温贮藏是一种绿色、安全、非冻结保鲜技术<sup>[32]</sup>,将肉储藏在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下至各自冻结点范围内,减少冰晶对组织结构造成物理损伤,可抑制微生物的活动和酶活性、延缓细胞自溶和氧化,达到保持品质、延长货架期的目的。目前,关于冰温技术在冷鲜畜禽肉制品中的研究较多,如与  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  冷藏相比,冰温保鲜牛肉的货架期延长了 3 d<sup>[33]</sup>,羊肉的货架期延长 9 d<sup>[34]</sup>。

此外,冰温常与其他技术联合使用,如冰温联合电子束辐照(8 kGy)保鲜技术能够显著抑制不动杆菌属(*Acinetobacter*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)、魏斯氏菌属(*Weissella*)、乳酸杆菌属(*Lactiplantibacillus*)和肉食杆菌属(*Caronbacteriu*)等微生物的生长,延长货架期<sup>[25]</sup>。冰温联合抗菌复合膜可改善烧鸡的外观、色泽,货架期延长至 20 d<sup>[35]</sup>。冰温联合 MAP 储藏冷鲜猪肉,与冷藏组相比 30 d 时菌落总数均低于  $5\text{ lg CFU/g}$ ,有效延长冷鲜猪肉贮藏货架期<sup>[36]</sup>。以上研究结果表明,冰温与其他保鲜技术的联合使用,具有广阔的市场应用前景。

## 2 天然抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品中的应用

天然抗菌剂分为植物源、动物源和微生物源三类,天然抗菌剂通常通过两种作用来抑制肉制品中微生物的生长:a.通过破坏微生物细胞膜的通透性和流动性及细胞壁的完整性,使胞内营养物质和代谢产物无法正常流通,生长所需的营养物质减少至停滞;b.通过阻碍微生物迁移和粘附,抑制蛋白质和遗传物

质合成,抑制微生物正常生长<sup>[37]</sup>,见图 5。

### 2.1 植物源

植物源抗菌剂包括酚类、多糖类和黄酮类等<sup>[38]</sup>。目前单一使用植物源抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品中研究较多,可将天然抗菌剂包埋于精油、壳聚糖等物质中,制备成抗菌涂层、涂膜,在冷鲜畜禽肉制品储藏过程中作为屏障起到抑制微生物生长、减缓氧化变质、减少水分损失、延缓气体扩散、阻隔光线等作用<sup>[39-40]</sup>,提高保鲜效果。

酚类是广泛存在于自然界中且具有抗菌生物活性的植物次生代谢产物,通过增加细菌细胞膜的通透性、降低胞内 ATP 浓度、下调基因等途径,阻止能量代谢、蛋白质、DNA 和 RNA 合成,达到抑菌效果<sup>[41]</sup>。常见的具有保鲜作用的酚类物质有绿原酸、咖啡酸、没食子酸、儿茶素等。酚酸对禽肉最常见的腐败菌空肠弯曲杆菌(*Campylobacter jejuni*)有明显抑制作用<sup>[42]</sup>。酚类联合使用可增强抗菌性,如绿原酸、咖啡酸、没食子酸、儿茶素等酚类<sup>[43]</sup>可联合使用对革兰氏阴性菌和阳性菌均有较强抑制作用,可增加综合抗菌性能。茶多酚保鲜液<sup>[44]</sup>冷藏冷鲜牛肉与对照组相比,保鲜期约延长至 9 d。香芹酚/百里酚纳米乳液形成阻隔层、粘合层和负载层的薄膜<sup>[45]</sup>,可延长猪肉保质期至 11 d。在冷藏条件下,茶多酚抗菌膜<sup>[46]</sup>可保持鸡肉品质,使保质期延长了 6 d。

多糖是由不同种类糖苷键连接成的单糖而组成的生物大分子,通过增加微生物细胞壁和细胞膜的通透性、破坏细胞膜中酶的完整性、阻碍细胞膜功能等作用来达到抗菌的目的<sup>[47]</sup>。20 mg/mL 辣木籽多糖<sup>[48]</sup>可破坏冷鲜牛肉中的大肠杆菌,有效延缓保质期至 9 d。在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  下,油茶粕多糖和普鲁兰多糖复合保鲜涂膜<sup>[49]</sup>延长新鲜鸡肉保质期至 12 d。含黑木耳多糖(AAP)薄膜<sup>[50]</sup>抑制肉制品中大部分微生物生

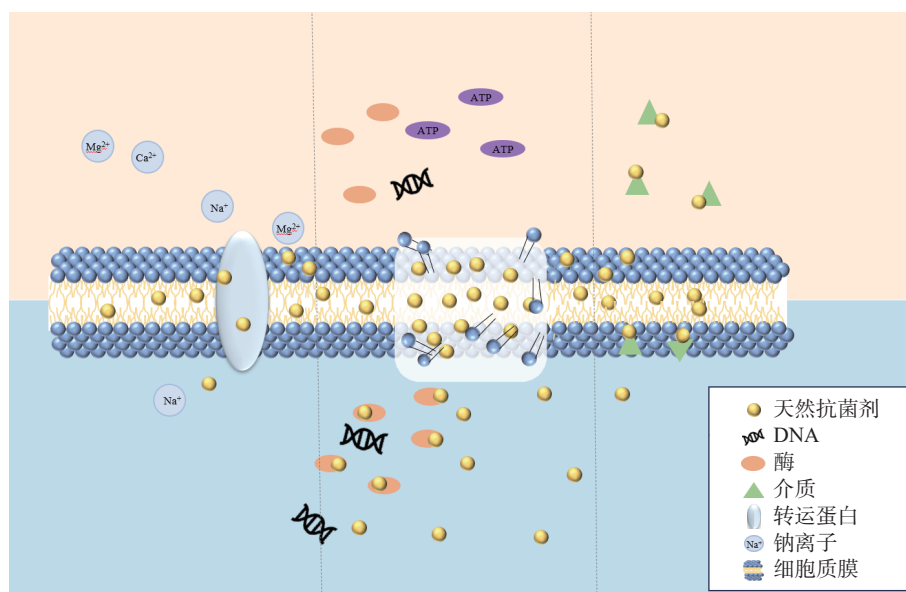


图 5 冷鲜畜禽肉制品利用天然抗菌剂的抑菌机理

Fig.5 Chilled livestock and poultry meat products using natural antibacterial agents field preservation antibacterial mechanism

长,较单一使用壳聚糖的保鲜期多 2 d。

黄酮类化合物是由植物细胞产生的次级代谢产物,通过影响微生物细胞膜通透性发挥抑菌作用<sup>[51]</sup>。在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的应用广泛,添加青钱柳黄酮(CPF)的明胶-壳聚糖(GEL-CS)薄膜具有较好的抗菌活性,将冰鲜牛肉保质期延长至 14 d<sup>[52]</sup>。花生壳黄酮-海藻酸钠/低酰基结冷胶(PSFs-SA/LGG)复合膜抑制冷鲜猪肉贮藏期菌落总数升高,货架期延长至 9 d<sup>[53]</sup>。在 4 ℃ 下,蒲公英黄酮复合膜较纯壳聚糖膜,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有较好抑制作用,延长鸡肉保质期至 12 d<sup>[54]</sup>。在冷鲜畜禽肉制品保鲜中,将天然抗菌生物活性物质包埋在抗菌膜、微胶囊等材料中的研究广泛,不仅创新了保鲜技术,增强保鲜效果,且具有较大的应用潜力。

精油的疏水特性和作用方式决定了生物活性成分和抑菌作用,通过破坏微生物细胞膜结构和渗透性,导致细胞成分和功能丧失<sup>[55]</sup>。精油可从牛油果、迷迭香、百里香和肉桂中提取,应用于冷鲜畜禽肉制品的保鲜中。牛至精油的挥发性化合物可抑制牛肉中腐败微生物生长及代谢产物活性,使菌落总数降低 1~2 lg CFU/g,延长货架期<sup>[56]</sup>。关于精油保鲜的研究越来越广泛,具有保鲜效果好、安全的优点,可扩展其在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的应用范围。

2.2 动物源

在冷鲜畜禽肉制品保鲜中常用的动物源天然抗菌剂包括多糖和蛋白质源。壳聚糖是常用的多糖源天然抗菌剂,通过破坏微生物细胞膜发挥抑菌作用,具有广泛的抗菌、抗氧化、生物可降解、无毒的特性,尤其对革兰氏菌有强烈的抗菌作用。壳聚糖可作为食品保鲜成膜剂与其他抗菌物质联合直接涂覆于食品表面<sup>[57]</sup>,壳聚糖复合纳米银纳米颗粒对牛肉糜中大肠杆菌(*Escherichia coli*)和鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)有较强抑制作用,可起到较好的保鲜效果<sup>[58]</sup>。在 4 ℃ 下,壳聚糖/细菌素(NBCNs)/肉桂精油制备成微胶囊化的海绵垫应用于冷却猪肉保鲜<sup>[59]</sup>,使保质期从 4 d 延长至 10 d 左右。

蛋白质源天然抗菌剂包括明胶、胶原蛋白、乳清

蛋白、玉米醇溶蛋白等<sup>[60]</sup>,其中明胶可与其他天然抗菌剂制成成膜保鲜液、涂膜能较好附着在肉样上,增强保鲜效果<sup>[61]</sup>。后鹏飞等<sup>[62]</sup>使用 5%、10% 噬菌体-明胶膜冷藏预制牛肉,发现沙门氏菌污染 7 d 后,沙门氏菌菌落数比对照组分别降低 0.97、1.25 lg CFU/g,延长了牛肉保质期。任宏茹<sup>[63]</sup>对比了胶原蛋白-壳聚糖与明胶-壳聚糖涂膜液保鲜冷鲜猪肉的效果,发现胶原蛋白-壳聚糖和明胶-壳聚糖涂膜液分别使猪肉货架期延长 8 d 和 6 d,胶原蛋白-壳聚糖涂膜液保鲜效果优于明胶-壳聚糖涂膜液。冷鲜畜禽肉制品保鲜中使用动物源抗菌剂的研究最广泛,可有效改善品质、延长货架期,且价格低廉,具有较大的应用潜力。

2.3 微生物源

微生物源天然抗菌剂包括  $\epsilon$ -聚赖氨酸、乳酸链球菌(Nisin)等抗菌肽,其中 Nisin 是一种具有抗菌谱广、稳定性好、安全无毒、杀菌效果好等特性的生物活性抗菌肽,通过 C-末端离子相互作用与细胞膜结合,在细胞膜上使疏水 N-末端穿透形成孔隙,导致质子动力被中断、细胞材料泄漏<sup>[64]</sup>,有效杀灭或抑制乳酸杆菌(*Lactobacillus*)、葡萄球菌(*Staphylococcus*)、肉毒梭菌(*Clostridium botulinum*)、李斯特菌等腐败微生物生长,尤其是对革兰氏阳性菌的抑制效果较好<sup>[65]</sup>。

Nisin 在冷鲜畜禽肉制品保鲜领域应用较广泛,除单一使用外,还常与  $\epsilon$ -聚赖氨酸、细菌素和精油等物质联合使用对多种微生物具有协同抗菌作用,可改善储藏期间肉制品的品质<sup>[66]</sup>。Nisin 负载细菌素(NBCNs)可显著抑制真空包装牛肉中鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)和肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)生长<sup>[67]</sup>。Nisin 与部分精油存在协同抑菌作用,八角茴香精油、 $\epsilon$ -聚赖氨酸和 Nisin 组合的 NEACb 是一种改善即食猪肉制品货架期的涂膜剂,显著抑制了大肠杆菌的生长,使猪肉货架期延长 4 d<sup>[65]</sup>。由此可见,多种天然抗菌剂联合使用存在协同抗菌、改善肉制品品质和延长货架期的作用<sup>[68]</sup>,同时制备成可食用复合涂层拓宽了食品包装和保鲜的应用领域(表 2)。

表 2 天然抗菌剂在冷畜禽肉制品中的应用

| Table 2 Application of natural antibacterial agents in chilled livestock and poultry meat products |                                |      |      |                                                       |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------------------------------------------|------|
| 分类                                                                                                 | 抗菌物质                           | 成膜方式 | 包装食品 | 应用效果                                                  | 参考文献 |
| 植物源                                                                                                | 丁香精油                           | 涂膜   | 猪肉   | 两种天然抗菌剂能抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌生长繁殖,提高涂膜抗菌和抗氧化性能,延长猪肉货架期6~10 d | [69] |
| 动物源                                                                                                | 壳聚糖                            | 涂层   | 猪肉   | 壳聚糖-柠檬膜对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有抗菌能力,降低鲜肉中总活菌数和挥发性碱性氮值          | [70] |
| 微生物源                                                                                               | Nisin                          | 薄膜   | 鸡肉   | 鸡肉模拟单核细胞增生李斯特菌污染, Nisin 有显著抑制作用,在冷藏条件下延长鸡肉货架期至15 d    | [37] |
| 植物源                                                                                                | 薰衣草精油                          | 离心纺丝 | 羊肉   | 添加精油的活性包装有效延缓羊肉微生物腐败                                  | [71] |
| 动物源                                                                                                | 明胶                             | 涂层   | 牛肉   | 在明胶复合涂层可减少牛肉脂质氧化和微生物生长、改善肉质,有助于延长保质期                  | [72] |
| 植物、动物源                                                                                             | 壳聚糖、牛至精油                       | 微胶囊膜 | 猪肉   | 微胶囊膜包装猪肉能抑制风味裂变、微生物生长,并延长货架期延长至12 d,比空白对照组长6 d        | [73] |
| 植物、微生物源                                                                                            | 八角茴香精油、 $\epsilon$ -聚赖氨酸、Nisin | 涂层   | 猪肉   | 复合抗菌涂层显著抑制了大肠杆菌的生长,使货架期延长4 d                          | [68] |

### 3 联合技术在冷鲜畜禽肉制品中的应用

由于非热物理技术及天然抗菌剂均存在局限性,因此常在冷鲜畜禽肉制品保鲜中使用联合技术,提高抗菌性。辐照、高压静电场、冰温和气调联合天然抗菌剂等技术在冷鲜畜禽肉制品保鲜研究中应用广泛,常见的联合方式见表 3。

表 3 在冷鲜畜禽肉制品领域非热物理技术及天然抗菌剂联合使用

Table 3 Combined use of natural antibacterial agents and non-thermophysical techniques in chilled livestock and poultry meat products

| 抗菌物质            | 非热物理技术 | 包装食品 | 应用效果                                                                                      | 参考文献 |
|-----------------|--------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 迷迭香提取物、Nisin    | 辐照     | 羊肉   | 迷迭香油提取物阻止肌原纤维蛋白中巯基的损失,辐照与 Nisin 联合使用防止肉中细菌腐败                                              | [74] |
| 壳聚糖、葡萄籽提取物      | 伽马辐照   | 鸡肉   | 辐照联合抗菌涂层可延长鸡肉保质期至 14 d                                                                    | [75] |
| 壳聚糖、茶多酚、Nisin   | 辐照     | 卤鸡   | 辐照联合保鲜涂层有效延长酱卤鸡货架期                                                                        | [76] |
| 茶多酚             | 辐照     | 鸡肉   | 辐照联合天然抗菌剂使鲜鸡肉保质期延长至 28 d                                                                  | [77] |
| 葡萄柚籽提取物、姜黄素、壳聚糖 | 辐照     | 鸡肉   | 对照组 3 d 时微生物开始上升,辐照联合复配保鲜液可显著抑制鸡肉中微生物的生长,相比于对照组贮藏 6 d 时微生物开始上升                            | [78] |
| 壳聚糖、茶多酚、Nisin   | 冰温     | 猪肉   | MAP(75% O <sub>2</sub> +20% CO <sub>2</sub> +5% N <sub>2</sub> )联合生物保鲜剂可延长冷鲜滩羊肉货架期约 4~6 d | [14] |

#### 3.1 辐照技术及天然抗菌剂联合使用在冷鲜畜禽肉制品中的应用

肉制品经过辐照处理,导致化学键断裂,出现自由基、微生物等新辐照产物,造成内部元素发生变化<sup>[79]</sup>,加速肉制品氧化,产生不良品质等问题,可联合香芹酚、茶多酚、儿茶素、迷迭香、Nisin、溶菌酶等具有抗氧化性的天然抗菌剂减缓冷鲜畜禽肉制品氧化。但天然抗菌剂在实际应用中受 pH、温度、O<sub>2</sub>、光照和储存时间等因素影响,导致生物活性降低,不利于抗菌物质释放,可通过包埋技术,如涂层、微胶囊和涂膜等技术提高抗菌性。辐照联合天然抗菌剂可相互弥补在冷鲜畜禽肉制品杀菌和抗菌过程中的局限性,使保鲜效果和货架期显著增加。辐照联合 Nisin 可有效防止细菌造成的肉类腐败,减少因辐照产生的不良影响<sup>[73]</sup>。辐照联合明胶-核黄素、银纳米粒子涂膜冷藏保鲜肉制品,使货架期延长至 21 d,且辐照弥补了涂膜亲水性的缺点,使聚合物结构更加紧密<sup>[80]</sup>。目前,辐照及天然抗菌涂层联合处理是一种新型保鲜方式,对冷鲜畜禽肉制品影响的研究较多,但其协同抑菌作用机理还有待完善。

#### 3.2 MAP 及天然抗菌剂联合使用在冷鲜畜禽肉制品中的应用

单一使用 MAP 保鲜冷鲜畜禽肉制品的保质期较短,通常联合天然抗菌剂涂层增强抑菌性。壳聚

糖/Nisin/没食子酸涂层对高氧 MAP 包装猪里脊肉<sup>[81]</sup>有减少脂质和蛋白质氧化、抑制微生物生长的作用,使保质期延长至 20 d。高氧 MAP 联合 Nisin/茶多酚<sup>[14]</sup>的复合抗菌剂贮藏冷鲜羊肉相比单一使用 MAP,菌落总数值减少 2.01 lg CFU/g,且维持了冷鲜羊肉良好品质,并将货架期延长约 4~6 d。肉桂精油-壳聚糖涂膜/聚偏二氯乙烯(PVDC)协同低氧 MAP<sup>[82]</sup>在黑猪肉贮藏后期对假单胞菌的抑制效果显著,延长货架期约 4 d。以上研究表明,在冷鲜畜禽肉制品保鲜中,MAP 联合天然抗菌涂层可通过抑制特定腐败菌的生长,达到延长保质期的目的。

#### 3.3 高压电场及天然抗菌剂联合使用在冷鲜畜禽肉制品中的应用

由于微生物对高压电场技术的易感性不同,使其对冷鲜畜禽肉制品保鲜效果不如预期,因此常与其他保鲜技术联合使用。甘可凡等<sup>[83]</sup>研究发现低温等离子体(CP)协同肉桂精油和丁香精油贮藏牛肉可保持牛肉感官品质,有效降低牛肉中菌落总数和假单胞菌数,并将货架期延长 6 d。Chen 等<sup>[84]</sup>研究发现高压静电场(HVEF)与肉桂精油的协同作用可改变猪肉末中微生物细胞膜的通透性和完整性,活性氧含量增加,且联合使用时肉桂精油用量仅为单一使用时的 1/4~1/3,猪肉末的保质期延长 4 d,不会影响原有品质。联合天然抗菌剂可弥补高压电场在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的不足,增强保鲜效果,扩大高压电场的应用范围。

#### 3.4 冰温及天然抗菌剂联合使用在冷鲜畜禽肉制品中的应用

由于冰温技术对制冷设备的精确度要求严格,在实际应用中达成度相对较低,导致保鲜效果难以达到预期,因此通常与天然抗菌剂联合使用。白晓州<sup>[85]</sup>研究冰温联合牧豆叶提取物和茶多酚复配液对牛肉品质的影响,与未处理组相比牛肉保质期延长 12 d。李维正等<sup>[86]</sup>研究冰温联合果胶和迷迭香精油复合对牛肉影响,联合处理与冰温贮藏相比可显著降低牛肉菌落总数,延长货架期至 24 d。综上所述,冰温联合天然抗菌剂是近年研究的新保鲜技术,可显著增强冷鲜畜禽肉制品的保鲜效果,但研究应用较少,应扩大冰温联合天然抗菌剂在冷鲜畜禽肉制品保鲜领域的应用范围。

### 4 总结与展望

冷鲜畜禽肉制品的消费市场巨大,但存在易腐败变质的问题,影响食品安全、健康和营养等,限制消费市场的扩大,因此保鲜是急需解决的问题。目前,使用化学添加剂保鲜冷鲜畜禽肉制品的研究较多,但已不能满足人们对食品安全和健康的需求,因此开始向非热物理技术和天然抗菌剂保鲜的方向研究。本文综述了非热物理技术(辐照、MAP、冰温、高压电场)和天然抗菌剂(Nisin、茶多酚、壳聚糖等)

以及联合技术在冷鲜畜禽肉制品保鲜中的应用,均有抑制微生物生长、延长保质期的作用。辐照、MAP、高压电场、冰温联合天然抗菌剂,不仅可提升冷鲜畜禽肉制品的保鲜效果,还可拓展在冷鲜畜禽肉制品中的应用范围。需要针对冷鲜畜禽肉制品中腐败菌的种类选择适宜的保鲜技术,达到更好的保鲜效果。

随着保鲜包装技术的不断发展,食品智能包装在冷鲜畜禽肉制品的应用逐渐成为研究热点。从聚乳酸、聚羟基丁酸等生物可降解食品智能包装材料改性的角度联合天然抗菌剂,创新包装技能,如新鲜度指示、控温、保鲜。非热物理技术可联合食品智能包装的电致变色、热致变色、光致变色作用协同抑菌保鲜。尽管在冷鲜畜禽肉制品的保鲜应用中,非热物理技术及天然抗菌剂的联合使用已被广泛研究,但其抑菌机制仍待深入探讨,以期完善和推广这一创新的保鲜策略。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 姚凯勇,陈斌丹,蔡杰,等.天然抑菌剂对禽肉制品的作用机制及应用研究进展[J].浙江农业科学,2023,64(8):1999-2005. [YAO K Y, CHEN B D, CAI J, et al. Research progress and mechanism of natural antimicrobial agents on poultry meat products[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(8): 1999-2005.]
- [2] 中国肉类协会:2022年我国肉类总产量超9000万t[J].今日养猪业,2023(4):14. [China Meat Association: China's total meat output to exceed 90 million tonnes in 2022[J]. Pig Farming Today, 2023(4): 14.]
- [3] 杨辉,邢东辉,王露.复合抗氧化保鲜包装薄膜对冷鲜肉保鲜效果的研究[J].农业技术与装备,2024(6):165-168. [YANG H, XING D H, WANG L. Study on the effect of composite antioxidant preservation packaging film on the preservation of chilled fresh pork[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2024(6): 165-168.]
- [4] 邓兴群,尤娟,刘茹,等.负载肉桂醛-单宁酸纳米乳液的壳聚糖涂层的制备及其对冷鲜肉保鲜效果[J].食品工业科技,2025,46(3):350-360. [DENG X Q, YOU J, LIU R, et al. Preparation of chitosan coating loaded with cinnamaldehyde-tannic acid nano-emulsion and its effect on the preservation of chilled meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 350-360.]
- [5] 黄信斌,钟添宇,程婕,等.不同水分活度食品的货架期预测方法[J].保鲜与加工,2023,23(10):71-80. [HUANG X E, ZHONG T Y, CHENG J, et al. Shelf life prediction method of food with different water activities[J]. Storage and Process, 2023, 23(10): 71-80.]
- [6] 闫小杰,白乌日力嘎,康连和,等.冷鲜牛肉贮藏保鲜技术研究进展[J].食品工业,2023,44(12):196-201. [YAN X J, BAI W R L G, KANG L H, et al. Research progress on storage and preservation technology of chilled beef[J]. The Food Industry, 2023, 44(12): 196-201.]
- [7] 刘晓红,李嘉文,翟平平,等.卤鸭脖中优势腐败菌和致病菌的分离与鉴定[J].肉类工业,2012,374(6):32-34. [LIU X H, LI J W, ZHAI P P, et al. Separation and identification of dominant spoilage bacteria and pathogenic bacteria of sauced duck neck[J]. Meat Industry, 2012, 374(6): 32-34.]
- [8] FIDEL-TOLDRA M F. Chemistry, safety, and regulatory considerations in the use of nitrite and nitrate from natural origin in meat products-Invited review[J]. Meat Science, 2021, 171: 108272.
- [9] OTOO E A, OCLOO F C K, VICTORI A. Effect of gamma irradiation on shelf life of smoked guinea fowl (*Numida meleagris*) meat stored at refrigeration temperature[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 194: 110041.
- [10] DERAKHSHAN Z, GEA O C, ALI H, et al. Survey on the effects of electron beam irradiation on chemical quality and sensory properties on quail meat[J]. Food and Chemical Toxicology, 2018, 112: 416-420.
- [11] LI Y X, ZHOU C Y, HE J et al. Combining e-beam irradiation and modified atmosphere packaging as a preservation strategy to improve physicochemical and microbiological properties of sauced duck product[J]. Food Control, 2022, 136: 108889.
- [12] 沙坤,李思源,张松山,等.高压静电场下发酵牛肉风味品质及微生物群落特性研究[J].农业机械学报,2023,54(10):371-380,398. [SHA K, LI S Y, ZHANG S S, et al. Effect of high voltage electrostatic field on flavor quality and microbial community of fermented beef[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2023, 54(10): 371-380,398.]
- [13] 王宇.新型聚乙烯气调包装薄膜的制备及性能研究[D].上海:东华大学,2022. [WANG Y. Study on the preparation and properties of new modified atmosphere packaging polyethylene film[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.]
- [14] 马小菊.生物保鲜剂结合气调包装对冷鲜滩羊肉贮藏品质的影响研究[D].宁夏:宁夏大学,2023. [MA X J. Effect of biological preservative treatment combined with modified atmosphere packing on storage quality of chilles Tan mutton[D]. Ningxia: Ningxia University, 2023.]
- [15] CHA H Y, LIANG S M, SHI K Y, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the quality characteristics and bacterial community succession of super-chilled chicken meat in bio preservation[J]. LWT, 2023, 189: 189115547.
- [16] HOU X F, ZHAO H L, YAN L T, et al. Effect of CO<sub>2</sub> on the preservation effectiveness of chilled fresh boneless beef knuckle in modified atmosphere packaging and microbial diversity analysis[J]. LWT, 2023, 187(15): 115262.
- [17] 张小娟,杨可欣,郭嘉乾,等.改性聚醚醚酮在气调包装膜领域的研究进展[J].中国塑料,2024,38(2):95-104. [ZHANG X J, YANG K X, GUO J Q, et al. Research progress in modification of poly(ether ether ketone) for modified atmosphere packaging membrane[J]. China Plastics, 2024, 38(2): 95-104.]
- [18] 夏明慧.牛肉冰温保鲜技术与方便干锅肉品的开发研究[D].成都:成都大学,2022. [XIA M H. Development of beef near-freezing temperature technology and its convenient dried pot products[D]. Chengdu: Chengdu University, 2022.]
- [19] 李杰,刘朋,王莹.气调保鲜技术在食品中的应用——评《食品贮藏与保鲜》[J].食品安全质量检测学报,2023,14(21):323. [LI J, LIU M, WANG Y. Application of air-conditioning preservation technology in foodstuffs-review of food storage and preservation[J]. Journal of Food Safety and Quality Testing, 2023, 14(21): 323.]
- [20] 茹志莹,陈芷雯,吴少福,等.冰温气调保鲜对鸡肉保鲜的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1213-1221. [RU Z Y, CHEN Z W, WU S F, et al. Effects of preservation by means of freezing temperature and air conditioning on chicken quality during

- storage[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42(6): 1213–1221.]
- [21] FARKAS J. Irradiation for better foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(4): 148–152.
- [22] 何凯锋, 陈秀金, 臧鹏, 等. 辐照杀菌技术对食品品质的影响及控制研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(10): 299–305. [HE K F, CHEN X J, ZANG P, et al. Research progress on the effect of irradiation sterilization on food quality and its control[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(10): 299–305.]
- [23] 魏文婧. 低能电子束处理对冷鲜牛排品质及货架期的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [WEI W J. Effects of low energy electron beam treatment on the quality and shelf life of chilled beef steak[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.]
- [24] FENG X, CHEORUN J, KI-CHANG N, et al. Effect of irradiation on the parameters that influence quality characteristics of raw beef round eye[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 45: 115–121.
- [25] 张玉蛟. 低能电子束处理结合冰温贮藏对冷鲜猪肉品质和货架期的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [ZHANG Y J. Effect of low energy electron beam treatment combined with superchilling on quality and shelf life of chilled pork[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.]
- [26] 齐梦圆, 刘卿妍, 石素素, 等. 高压电场技术在食品杀菌中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 284–292. [QI M Y, LIU Q Y, SHI S S, et al. Recent progress in the application of high-voltage electric field technology in food sterilization[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 284–292.]
- [27] 杨宇帆, 陈倩, 王浩, 等. 高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 316–320. [YANG Y F, CHEN Q, WANG H, et al. Research progress of high voltage electric field technology in food processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 316–320.]
- [28] ZHANG C, LYU X M, RAI-NAVEED A, et al. Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review[J]. *Food Chemistry*, 2023, 403: 134367.
- [29] 蔡颖萱, 魏文婧, 董鹏程, 等. 电子束辐照对肉中微生物和肉品质的影响及机制研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(8): 446–453. [CAI Y X, WEI W J, DONG P C, et al. Advances in the effect and mechanism of electron beam irradiation on microorganisms and meat quality[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(8): 446–453.]
- [30] 邝金艳, 林颖, 王丽, 等. 高压电场杀菌技术研究进展[J]. *肉类研究*, 2023, 37(9): 52–59. [KUANG J Y, LIN Y, WANG L, et al. Research progress in high-voltage electric field sterilization technology[J]. *Meat Research*, 2023, 37(9): 52–59.]
- [31] 魏琦. 蒙古奶酪冰温贮藏及其贮藏条件的优化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021. [WEI Q. Mongolian cheese storage under ice temperature and optimization of storage conditions[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.]
- [32] 申江, 王晓东, 王素英, 等. 冰温技术应用实验研究[J]. *制冷学报*, 2009, 30(4): 40–45. [SHEN J, WANG X D, WANG S Y, et al. Experimental study on application of hyo-on technology[J]. *Journal of Refrigeration*, 2009, 30(4): 40–45.]
- [33] 孙晶, 康怀彬, 程伟伟, 等. 冰温保鲜对牛肉品质特性影响的研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(11): 29–35. [SUN J, KANG H B, CHENG W W, et al. Study on the effect of ice temperature preservation on beef quality[J]. *Food Research and Development Food Res Dev*, 2021, 42(11): 29–35.]
- [34] 孙彦梅, 田铸, 李雪茹, 等. 冰温保鲜技术对肉品的调控及其应用研究进展[J]. *食品工业*, 2024, 45(6): 233–237. [SUN Y M, TIAN Z, LI X R, et al. Research progress on regulation and application of ice temperature preservation technology to meat[J]. *The Food Industry*, 2024, 45(6): 233–237.]
- [35] 花璐. 抗菌膜和冰温对符离集烧鸡协同保鲜效果的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022. [HUA L. The study of synergistic preservation effects of antibacterial coating and superchilling on Fuliji braised chicken[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.]
- [36] 欧佳存. 植物源抗菌剂的开发及应用[D]. 常州: 常州大学, 2022. [OU J C. Development and application plant-derived antibacterial agents[D]. Changzhou: Changzhou University, 2022.]
- [37] CARRION M G, CORRIPRO M A R, CONTRERAS J V H, et al. Optimization and characterization of taro starch, nisin, and sodium alginate-based biodegradable films: Antimicrobial effect in chicken meat[J]. *Poult Sci*, 2023, 102(12): 103100.
- [38] 赵冬雪, 杨晓溪, 郎玉苗. 天然抗菌剂在食品抑菌保鲜中的研究进展[J]. *食品工业*, 2021, 42(7): 204–207. [ZHAO D X, YANG X X, LANG Y M. Research progress of natural antibacterial agents in food preservation[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(7): 204–207.]
- [39] 郭依萍, 栗婧文, 窦晗, 等. 精准温控对冰温贮藏生鲜猪肉保鲜效果的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(1): 150–158. [GUO Y P, LI J W, DOU H, et al. Effect of precise temperature control on the preservation effect of fresh pork during ice-temperature storage[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(1): 150–158.]
- [40] KACHUR K, ZACHARIAS S. The antibacterial properties of phenolic isomers, carvacrol and thymol[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(18): 3042–3053.
- [41] 陈志迪, 王新宇, 李晴雯, 等. 植物源抗菌剂的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7433–7439. [CHEN Z D, WANG X Y, LI Q W, et al. Research progress of plant-derived antimicrobial agents[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(18): 7433–7439.]
- [42] YANG X, LAN W Q, SUN X H. Antibacterial and antioxidant properties of phenolic acid grafted chitosan and its application in food preservation: A review[J]. *Food Chemistry*, 2023, 428: 136788.
- [43] 祝超智, 温耀涵, 原晓喻, 等. 可食性抑菌膜在酱卤肉制品中的应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2020, 34(12): 81–86. [ZHU C Z, WEN Y H, YUAN X Y, et al. Recent progress in the application of edible antibacterial films in soy sauce and pot-roast meat products[J]. *Meat Research*, 2020, 34(12): 81–86.]
- [44] 顾伊榕, 闫立婷, 李双, 等. 不同保鲜剂对冷却牛霖肉保鲜效果的研究[J]. *食品安全导刊*, 2023(24): 103–105, 109. [GU Y R, YAN L T, LI S, et al. Study on the effects of different preservatives on preservation of chilled knuckle meat[J]. *China Food Safety Magazine*, 2023(24): 103–105, 109.]
- [45] WANG L, YUAN M Y, SUN E, et al. Antibacterial food packaging capable of sustained and unidirectional release carvacrol/thymol nanoemulsions for pork preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109169.
- [46] CHEN Z P, LIU R, WEI Y T, et al. A novel strategy to transform mango peel waste into useful product-Preparing antibacterial film containing tea polyphenols for chicken breast preservation[J]. *LWT*, 2024, 197: 115933.
- [47] PATEIRO M, MUNEKATA P E S, SANT A S, et al. Appli-

cation of essential oils as antimicrobial agents against spoilage and pathogenic microorganisms in meat products[J]. *Int J Food Microbiol*, 2021, 337: 108966.

[48] 严亮,朱玉润.辣木籽多糖抑菌作用及对牛肉保鲜效果研究[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(1): 24–32. [YAN L, ZHU Y R. Antibacterial effect of *Moringa oleifera* seed polysaccharide and its preservation effect on beef[J]. *China Food Additives*, 2024, 35(1): 24–32.]

[49] 敬思群,王梦琪,罗昕艳,等.基于油茶粕多糖的鸡肉保鲜涂膜的研制[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(10): 124–130. [JING S Q, WANG M Q, LUO X Y, et al. Preparation of compound cling film for chicken based on camellia meal polysaccharide[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(10): 124–130.]

[50] YU T, DI W, BIN L, et al. Preparation, characterization of *Auricularia auricula* polysaccharide-based films and application in meat preservation[J]. *International Journal of biological macromolecules*, 2023, 244: 125242.

[51] SKANDAMIS P N, GEORGE J E N. Preservation of fresh meat with active and modified atmosphere packaging conditions[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2002, 79(1): 35–45.

[52] YAN J, HE S C, CHEN L L, et al. Effect of gelatin-chitosan-cyclocarya paliurus flavonoids edible coating film on the preservation of chilled beef[J]. *LWT*, 2024, 199: 116138.

[53] 王聪,余群力,韩玲.花生壳黄酮-海藻酸钠/低酰基结冷胶复合膜在冷鲜猪肉保鲜中的应用[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2024, 1–12. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037058. [WANG C, YU Q L, HAN L. Application of peanut shell flavonoids-sodium alginate/low acyl gelatin composite films in chilled pork preservation[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 1–12. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037058.]

[54] 何惠利,任雪娇,张莉力.蒲公英黄酮-壳聚糖复合膜的制备及对冷鲜鸡胸肉保鲜的研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(7): 112–118. [HE H L, REN X J, ZHANG L L. Preparing dandelion flavonoids-chitosan composite membrane to preserve chilled chicken breast[J]. *Food Research and Development* 2022, 43(7): 112–118.]

[55] LIU X L, LIAO W Y, XIA W S. Recent advances in chitosan based bioactive materials for food preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108612.

[56] BADAWY M E I, TESBY M R L, SAMAR M S S. Preparation and antibacterial activity of chitosan-silver nanoparticles for application in preservation of minced meat[J]. *Bulletin of the National Research Centre*, 2019, 43(1): 1–14.

[57] AROKIYARAI S, YUVARAJ D, HAKDONG S. A comprehensive overview on the preservation techniques and packaging of processed meat products: Emphasis on natural derivatives[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2023, 36(1): 103032.

[58] GEDARAWATTE S T G, RAVENS DAL J T, HANA A S, et al. Antimicrobial efficacy of nisin-loaded bacterial cellulose nanocrystals against selected meat spoilage lactic acid bacteria[J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 251: 117096.

[59] CHEN C, DENG S Y, TIAN H X, et al. Novel bioactive sponge mats composed of oxidized bacterial cellulose and chitosan-gum arabic microcapsules loaded with cinnamon essential oil for enhancing meat preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 148: 109496.

[60] LI H H, QU S J, MA P, et al. Effects of chitosan coating combined with thermal treatment on physicochemical properties, bacterial diversity and volatile flavor of braised duck meat during re-

frigerated storage[J]. *Food Research International*, 2023, 167: 112627.

[61] 张跃宏,代浪浪,杨晨,等.明胶基薄膜的制备方法及在食品包装中的应用研究进展[J]. *精细化工*, 2024, 41(12): 2603–2615.

[ZHANG Y H, DAI L L, YANG C, et al. Research progress on the preparation method of gelatin-based composite film and its application in food packaging[J]. *Fine Chemicals*, 2024, 41(12): 2603–2615.]

[62] 后鹏飞,黄静,唐人杰,等.噬菌体-明胶抗菌膜的制备及其在预制牛肉保鲜中的应用[J]. *食品与发酵科技*, 2023, 59(2): 12–17,27. [HOU P F, HUANG J, TANG R J, et al. Preparation of phage-gelatin antibacterial film and its application in prepared beef preservation[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2023, 59(2): 12–17,27.]

[63] 任宏茹.林蛙皮胶原蛋白膜和明胶膜的制备及其对冷鲜猪肉保鲜作用研究[D]. 长春:吉林大学,2022. [REN H R. Preparation of collagen film and gelatin film from rana skin and their fresh-keeping effect on chilled pork[D]. Changchun: Jilin University, 2022.]

[64] 薛琪.乳酸链球菌素、乳酸钠对酱卤鸭脖腐败菌的协同抑菌作用与机理研究[D]. 杭州:浙江工商大学,2022. [XUE Q. Study on the synergistic antibacterial effect and mechanism of nisin and sodium lactate on spoilage bacteria of sauced duck[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]

[65] LIU Q, ZHANG M, BHESH B, et al. Effects of nanoemulsion-based active coatings with composite mixture of star anise essential oil, polylysine, and nisin on the quality and shelf life of ready-to-eat Yao meat products[J]. *Food Control*, 2020, 107: 106771.

[66] 魏奇,钟鑫荣,龚镁青,等. $\epsilon$ -聚赖氨酸和乳酸链球菌素协同抑菌效应的研究[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(21): 38–42. [WEI Q, ZHONG X R, GONG M Q, et al. Study on the antibacterial activity of  $\epsilon$ -polylysine and nisin[J]. *An Hui Nong Xue Tong Bao*, 2021, 27(21): 38–42.]

[67] SMAOUI S, BEN H H, BEN B O, et al. Recent advances in encapsulation of bioactive compounds as a promising technique for meat preservation[J]. *Meat Science*, 2021, 181: 108585.

[68] YIN W Q, QIU C, JI H Y, et al. Recent advances in biomolecule-based films and coatings for active and smart food packaging applications[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102378.

[69] ZHAO Z H, LIU H L, TANG J Y, et al. Pork preservation by antimicrobial films based on potato starch (PS) and polyvinyl alcohol (PVA) and incorporated with clove essential oil (CLO) Pickering emulsion[J]. *Food Control*, 2023, 154: 109988.

[70] SONG, Z Y, MA T C, ZHE X J, et al. Cellulosic films reinforced by chitosan-citric complex for meat preservation: Influence of nonenzymatic browning[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272: 118476.

[71] DOGAN C H, DOGAN N, GUNGOR M, et al. Novel active food packaging based on centrifugally spun nanofibers containing lavender essential oil: Rapid fabrication, characterization, and application to preserve of minced lamb meat[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 34: 100942.

[72] JRIDI M, MORA L, SOUSSI N, et al. Effects of active gelatin coated with henna (*L. inermis*) extract on beef meat quality during chilled storage[J]. *Food Control*, 2018, 84: 238–245.

[73] MA Y, YE K Y, LIU P, et al. Effect of a konjac glucomannan/chitosan antibacterial composite membrane microencapsulated with oregano essential oil on the quality of chilled pork[J]. *Applied*

- Food Research, 2023, 3(1): 100249.
- [74] AKHTER R, MASOODI F A, WANI T A, et al. Synergistic effect of low dose  $\gamma$ -irradiation, natural antimicrobial and antioxidant agents on quality of meat emulsions[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 189: 109724.
- [75] 曹宏, 蒋云升, 赖宏刚, 等. 辐照综合保鲜对冷鲜鸡货架期的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(9): 1746–1752. [CAO H, JIANG Y S, LAI H G, et al. Effect of irradiation integrated preservation on shelf life of chilled chicken[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(9): 1746–1752.]
- [76] HASSANZADEH P, TAJIK H, ROHANI S M R, et al. Effect of functional chitosan coating and gamma irradiation on the shelf-life of chicken meat during refrigerated storage[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2017, 141: 103–109.
- [77] 赖宏刚. 冷鲜鸡与酱卤制品辐照综合保鲜技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017. [LAI H G. Research on irradiation integrated preservation technology of chilled chicken and soy sauce and marinated products[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.]
- [78] 缪承杜, 温晓梅, 蓝碧锋, 等. 辐照协同复配保鲜剂对生鲜鸡肉的保鲜效果研究[J]. *食品科技*, 2024, 49(5): 107–114. [MIAO C D, WEN X M, LAN B F, et al. Effect of irradiation combined with compound preservative to preserve fresh chicken[J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(5): 107–114.]
- [79] SMAOUI S, BEN H 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.
- [80] SARMAST E, AHANKAR S, SALMIERI S, et al. Cross-linked gelatin-riboflavin-based film incorporated with essential oils and silver nanoparticle by gamma-irradiation: A novel approach for extending the shelf life of meat[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109330.
- [81] CAO Y, WARNER R D, FANG Z X. Effect of chitosan/nisin/gallic acid coating on preservation of pork loin in high oxygen modified atmosphere packaging[J]. *Food Control*, 2019, 101: 9–16.
- [82] 周强, 刘蒙佳, 张宝善, 等. 肉桂精油-壳聚糖涂膜协同气调包装对冷鲜肉品质的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, 45(6): 723–735. [ZHOU Q, LIU M J, ZHANG B S, et al. Combined effect of cinnamon essential oil-chitosan coating and modified atmosphere packaging on the quality of chilled meat[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2019, 45(6): 723–735.]
- [83] 甘可凡, 钱婧, 章建浩, 等. 低温等离子体协同复合精油对牛肉贮藏保鲜的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(21): 292–301. [GAN K F, QIAN J, ZHANG J H, et al. Effect of cold plasma synergistic composite essential oils on beef storage and freshness preservation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(21): 292–301.]
- [84] CHEN K, ZHANG M, DENG D, et al. The synergistic antimicrobial effects and mechanism of cinnamon essential oil and high voltage electrostatic field and their application in minced pork[J]. *Food Control*, 2024, 163: 110475.
- [85] 白晓州. 牧豆叶提取物-茶多酚复配液协同冰温保鲜对牛肉保鲜品质的影响[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(8): 73–77. [BAI X Z. The effect of *Prosopis juliflora* leaf extract and tea polyphenols compound solution combined with ice temperature preservation on fresh-keeping quality of beef[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(8): 73–77.]
- [86] 李维正, 杨丽华, 韩玲, 等. 果胶-迷迭香精油复合膜协同冰温贮藏对牛肉保鲜的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 146–151. [LI W Z, YANG L H, HAN L, et al. Effect of pectin-rosemary essential oil composite film cooperating with ice temperature storage in beef preservation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(20): 146–151.]