

冰温保鲜与气调包装协同调控预制黑椒牛柳食用品质

唐璐

(重庆市渝菜烹饪研究院, 重庆商务职业学院, 重庆 401331)

摘要: 预制黑椒牛柳在储运过程中易因微生物繁殖、脂肪氧化及蛋白质降解而发生品质劣变, 单一保鲜技术存在局限。为探究冰温保鲜与气调包装对其食用品质的协同调控效应, 本研究设置冰温 ($-1.5\pm0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 与冷藏 ($4\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$) 两种储藏温度, 结合真空包装及三种气调包装 ($70\%\text{ N}_2/30\%\text{ CO}_2$ 、 $60\%\text{ N}_2/40\%\text{ CO}_2$ 、 $50\%\text{ N}_2/50\%\text{ CO}_2$), 在 21 d 储藏期内测定菌落总数、挥发性盐基氮、丙二醛值、pH、水分活度、持水力、质构、色泽及感官品质等指标, 并采用主成分分析及相关性分析解析协同效应。结果表明, 储藏温度与气体配比对各项品质指标均有显著影响且存在协同交互作用, 其中冰温结合 $50\%\text{ N}_2/50\%\text{ CO}_2$ 处理组保鲜效果最优, 第 21 天时各项指标均显著优于其他处理组; 主成分分析表明, 挥发性盐基氮、丙二醛值、菌落总数与硬度是表征品质劣变的关键指标。冰温与 $50\%\text{ N}_2/50\%\text{ CO}_2$ 气调包装通过抑制微生物与酶活性、阻断脂肪氧化及协同抑菌等多重机制, 将预制黑椒牛柳货架期延长至 21 d, 为预制菜肴的高品质保鲜提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 预制菜; 黑椒牛柳; 冰温保鲜; 气调包装; 协同效应; 食用品质; 货架期

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.4.0089

Ice-Temperature Preservation Combined with Modified Atmosphere Packaging Synergistically Regulates the Eating Quality of Pre-Prepared Black Pepper Beef Fillet

TANG Lu

(Chongqing Yu Cuisine Culinary Research Institute, Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, China)

Abstract: Pre-prepared black pepper beef fillet is prone to quality deterioration during storage and transportation due to microbial proliferation, lipid oxidation, and protein degradation, and a single preservation technique has limitations. To investigate the synergistic regulatory effects of ice-temperature preservation and modified atmosphere packaging on its eating quality, this study set two storage temperatures-ice temperature ($-1.5\pm0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) and refrigeration ($4\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$)-combined with vacuum packaging and three modified atmosphere packaging conditions ($70\%\text{ N}_2/30\%\text{ CO}_2$, $60\%\text{ N}_2/40\%\text{ CO}_2$, and $50\%\text{ N}_2/50\%\text{ CO}_2$). During the 21-day storage period, total viable count, total volatile basic nitrogen (TVB-N), malondialdehyde (MDA) value, pH, water activity, water-holding capacity, texture, color, and sensory quality were measured, and principal component analysis and correlation analysis were employed to elucidate the synergistic effects. The results showed that both storage temperature and gas composition significantly affected all quality indicators, with a synergistic interaction between the two factors. The treatment group combining ice temperature with $50\%\text{ N}_2/50\%\text{ CO}_2$ exhibited the optimal preservation effect, and all indicators on day 21 were significantly superior to those of the other treatment groups. Principal component analysis revealed that TVB-N, MDA value, total viable count, and hardness were key indicators characterizing quality deterioration. Through multiple mechanisms including inhibition of microbial and enzymatic activities, blockage of lipid oxidation, and synergistic antibacterial effects, the combination of ice temperature and $50\%\text{ N}_2/50\%\text{ CO}_2$ modified atmosphere packaging extended the shelf life of pre-prepared black pepper beef fillet to 21 days, thereby providing a theoretical basis and technical support for the high-quality preservation of prepared dishes.

Key words: prepared dishes; black pepper beef fillet; ice-temperature preservation; modified atmosphere packaging; synergistic effect; edible quality; shelf life

收稿日期: 2026-01-16; 修回日期: 2026-04-10; 接受日期: 2026-04-10

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (CSTB2023TIAD-KPX0036); 重庆商务职业学院重点课题 (2025XJKTZD02)

作者简介: 唐璐 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品研究与开发, 生物发酵工程, 食品质量检测, 食品经济, E-mail: zdyzdzq@yeah.net

预制黑椒牛柳作为广受欢迎的经典中式菜肴制品,其市场消费需求随着餐饮标准化及家庭便捷化趋势而持续增长^[1]。然而,该产品富含蛋白质、脂肪及水分,在贮运流通过程中极易因微生物生长繁殖、内源酶作用以及脂肪与蛋白质的氧化降解而发生品质劣变,具体表现为色泽褐变、风味丧失、质地硬化或松散、汁液渗出等,严重制约了产品的商业货架期与消费者体验^[2]。预制菜肴在冷藏(如 4 °C)储存期间,其质量下降常与微生物群落变化密切相关,微生物活动不仅直接导致腐败,还可能调控亚硝酸盐和生物胺等有害物质的形成,进一步影响食品安全和感官品质^[3],而如何抑制预制菜中亚硝酸盐的积累,也成为其品质控制的研究重点^[4,5]。此外,中国消费者对于具有潜在安全风险的预制菜肴,会基于利益与风险的权衡进行接受度判断^[6],而食品安全事件引发的负面舆论,其影响虽然具有动态变化的特征,但会在特定时期内显著影响消费者的风险感知和接受度^[7]。因此,开发有效的保鲜技术以保障预制菜肴的品质与安全,对于提升消费者信心和市场竞争力至关重要。

冰温保鲜技术(通常控制在-1.5 °C至 0 °C食品冻结点以上)能够在不引起冻结的前提下,最大程度地抑制微生物与酶活性,同时避免因冰晶形成导致的汁液流失与质构损伤,尤其适用于高价值肉制品的保鲜^[8-10]。例如,非靶向代谢组学研究表明,冰温保鲜能有效维持牦牛肉的新鲜度品质^[11]。气调包装(Modified Atmosphere Packaging, MAP)通过调节包装内 O₂、CO₂、N₂ 等气体的比例,创造不利于好氧菌生长与氧化反应的环境,已成为延长冷鲜肉及调理肉制品货架期的有效手段^[12]。其中,高浓度 CO₂(通常>20%)对多数腐败菌与致病菌具有显著抑制作用^[13,14],而 N₂作为填充气体可防止包装塌陷并抑制需氧反应^[15]。然而,单一保鲜技术仍存在局限性^[16,17]:冰温虽能延缓变化,但无法完全阻止嗜冷菌的生长与缓慢进行的生化反应^[18,19];MAP 则高度依赖于持续的低温环境以维持 CO₂的有效溶解与抑菌浓度^[20]。

目前,针对冰温与特定气体配比 MAP 相结合,并系统探究其对复杂调味肉类预制菜肴(如黑椒牛柳)品质协同调控效应的研究尚不多见。二者的结合可能产生“1+1>2”的协同效应:冰温为 MAP 提供了稳定高效的低温基础环境,而 MAP 则从气态环境层面弥补了冰温无法控制的氧化与需氧腐败问题。因此,本研究旨在系统探究冰温保鲜与不同 CO₂浓度气调包装对预制黑椒牛柳在储藏过程中微生物、理化、质构及感官品质的影响规律,明确其协同保鲜机制,以期为开发高品质、长货架期预制黑椒牛柳产品提供理论依据与技术支撑。

1 材料和方法

1.1 材料

新鲜牛里脊肉(符合 GB 2707-2016),购自本地正规屠宰场。市售黑胡椒酱、青椒、红椒、洋葱等辅料。

1.2 试剂

L-酪氨酸(分析纯, CAS: 60-18-4),国药集团化学试剂有限公司;福林酚(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;三氯乙酸(分析纯, CAS: 76-03-9),国药集团化学试剂有限公司;无水碳酸钠(分析纯, CAS: 497-19-8),国药集团化学试剂有限公司;无水磷酸氢二钠(分析纯, CAS: 7558-79-4),国药集团化学试剂有限公司;无水磷酸二氢钠(分析纯, CAS: 7558-80-7),国药集团化学试剂有限公司;氢氧化钠(分析纯, CAS: 1310-73-2),国药集团化学试剂有限公司;冰乙酸(分析纯, CAS: 64-19-7),国药集团化学试剂有限公司;四水酒石酸钾钠(分析纯, CAS: 6100-16-9),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;苯酚(分析纯, CAS: 108-95-2),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无水亚硫酸钠(分析纯, CAS: 7757-83-7),国药集团化学试剂有限公司;2-巯代巴比妥酸(TBA,分析纯, CAS: 504-17-6),上海源叶生物科技有限公司;氧化镁(分析纯, CAS: 1309-48-4),国药集团化学试剂有限公司;硼酸(分析纯, CAS: 10043-35-3),国药集团化学试剂有限公司;盐酸(分析纯, CAS: 7647-01-0),国药集团化学试剂有限公司;平板计数琼脂(生物试剂),上海源叶生物科技有限公司。

1.3 主要仪器与设备

DW-FL270 冰温保鲜柜,中科美菱低温科技股份有限公司;MAP-H360 气调包装机,上海浦姆机械制造有限公司;LRH-250 生化培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;UV-1800 紫外可见分光光度计,日本岛津公司;TA.XT Plus 质构分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;CR-400 色差计,日本柯尼卡美能达公司;AquaLab 4TE 水分活度仪,美国 Decagon Devices 公司;XW-80A 涡旋振荡器,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;AL104 电子天

平, 瑞士 Mettler Toledo 公司; FE28 pH 计, 瑞士 Mettler Toledo 公司; TGL-16MS 离心机, 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; SW-CJ-2D 超净工作台, 苏州进化设备有限公司; CentriVap 真空离心浓缩仪, 美国 Labconco 公司。

1.4 样品制备与处理设计

1.4.1 预制黑椒牛柳制备

牛里脊肉切条 (1 cm×1 cm×5 cm), 经清洗、沥干后, 按固定配方 (肉:酱汁=7:3, *m/m*) 与黑椒酱及其他辅料均匀混合。将混合后的物料定量分装于聚丙烯/乙烯-乙烯醇共聚物/聚丙烯 (PP/EVOH/PP) 高阻隔性托盘 (透气率 <5 cm³/(m² 24 h 0.1 MPa)) 中, 每份样品净重 150 g。

1.4.2 实验设计

采用双因素完全随机实验设计, 如表 1 实验共设 8 个处理组 (T1P1~T1P4, T2P1~T2P4), 每组设 3 个生物学重复。所有样品分别储藏在设定温度下, 于第 0、7、14、21 天取样检测。

表 1 实验分组

Table 1 Experimental grouping		
实验分组	因素 A: 储藏温度/℃	因素 B: 包装方式
1	T1: 冰温-1.5±0.5	P1: 真空包装 (对照)
2	T1: 冰温-1.5±0.5	P2: 气调包装 (MAP1, 70% N ₂ /30% CO ₂)
3	T1: 冰温-1.5±0.5	P3: 气调包装 (MAP2, 60% N ₂ /40% CO ₂)
4	T1: 冰温-1.5±0.5	P4: 气调包装 (MAP3, 50% N ₂ /50% CO ₂)
5	T2: 冷藏 4±1	P1: 真空包装 (对照)
6	T2: 冷藏 4±1	P2: 气调包装 (MAP1, 70% N ₂ /30% CO ₂)
7	T2: 冷藏 4±1	P3: 气调包装 (MAP2, 60% N ₂ /40% CO ₂)
8	T2: 冷藏 4±1	P4: 气调包装 (MAP3, 50% N ₂ /50% CO ₂)

注: T1、T2 分别表示冰温储藏和冷藏储藏; P1~P4 分别表示真空包装及三种气调包装 (MAP1、MAP2、MAP3)。所有气调包装均在气调包装机上一次性完成气体置换 (置换率>99%), 并热封成型。实验为完全随机设计, 每个处理组合建议设置 3 个或以上重复以进行统计分析。

1.4.3 指标测定方法

菌落总数: 参照 GB 4789.2-2022 进行测定, 结果以 lg CFU·g⁻¹ 表示。挥发性盐基氮: 参照 GB 5009.228-2016 微量扩散法测定。硫代巴比妥酸反应物值: 参考标准方法提取脂肪氧化产物, 比色法测定, 结果以丙二醛 (MDA) 当量 (mg MDA·kg⁻¹ 样品) 表示。质构剖面分析: 采用质构分析仪 TPA 模式。参数: P/36R 探头, 预压速度 2 mm·s⁻¹, 测试速度 1 mm·s⁻¹, 下压形变量 50%, 两次压缩间隔时间 5 s。测定硬度、弹性、咀嚼性。色泽: 使用色差计测定样品表面 *L* (明度)、*a* (红绿值)、*b* (黄蓝值), 计算总色差。水分活度与持水力: 水分活度仪直接测定。持水力参考离心法: 称取 5 g 均质样品, 3 000×*g* 离心 10 min, 计算持水力。pH 值: 取 5 g 绞碎样品, 加入 45 mL 蒸馏水均质后, 使用 pH 计测定匀浆液 pH 值, 每个样品重复测定 3 次, 取平均值。

1.4.4 感官评定指标

感官评定参照 GB/T 22210-2024 《肉与肉制品感官评定规范》, 在标准感官评定实验室内进行。由 10 名经过统一培训的感官评定员组成评定小组, 对样品的气味、色泽、质地、滋味及总体可接受性进行评价。样品经预处理 (于评定温度下平衡 1 小时) 并去除包装后, 随机编号呈递给评定员。评定采用 9 分制喜好度标度法, 具体评定指标与评分标准见表 2。

表 2 预制黑椒牛柳感官评定标准 (9 分制)

Table 2 Sensory evaluation criteria for pre-prepared black pepper beef fillet (9-point scale)					
评分/分	气味	色泽	质地	滋味	总体可接受性
9	黑椒与肉香味极其浓郁、	色泽鲜亮、均匀, 呈诱	肉质细嫩多汁, 软	黑椒风味浓郁突出,	极其喜欢, 愿意
	纯正、协调, 无任何异	人的棕褐色或浅褐色,	硬适中, 富有弹性,	咸甜适中, 肉鲜味	
7~8	味	无异常变色	咀嚼感极佳	足, 滋味丰富协调	立即购买
	香气明显、协调, 无异味	色泽正常, 亮度尚可,	质地尚嫩, 弹性较好,	风味协调, 滋味良	

		整体均匀	咀嚼感良好	好，无明显缺陷	
5~6	香气较淡或略有微弱 不协调气味	色泽稍暗或轻微不均匀	质地略硬或略软，弹性 一般，咀嚼感普通	滋味平淡，风味不够 突出或略有偏差	既不喜欢也不讨厌
3~4	香气很淡，或能察觉到 轻微异味	色泽暗淡，或出现局部明 显变色	质地粗糙、干柴或松 散，咀嚼困难	滋味不佳，能察觉 出异味	稍微不喜欢
1~2	异味明显，令人不悦	色泽异常，严重褐变或 呈现非正常颜色	质地极差，严重脱水或 呈糜烂状	滋味恶劣，无法接受	极其不喜欢

1.5 数据处理与统计分析

所有实验数据以“平均值±标准差”表示。采用 SPSS 26.0 软件进行双因素方差分析，并利用 Duncan’s 多重比较检验组间差异显著性 ($P<0.05$)，小写字母不同表示同一储藏时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)；大写字母不同表示同一处理不同储藏时间差异显著 ($P<0.05$)。采用 Origin 2025 进行主成分分析 (PCA)，关键指标动态变化趋势与皮尔逊相关性分析热图。

2 结果与讨论

2.1 菌落总数变化

微生物生长是导致预制菜肴腐败的首要因素。由图 1 可知，储藏温度和气调配比均对菌落总数有极显著影响 ($P<0.05$)，且存在交互作用。在整个储藏期内，所有冰温处理组 (T1) 的菌落总数始终显著低于对应的冷藏处理组 (T2)。在相同温度下，高浓度 CO_2 的 MAP 组 (P3, P4) 表现出更强的抑菌效果。其中，T1P4 组 (冰温+50% CO_2) 效果最为突出，在第 21 天时菌落总数仅为 $3.25 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ ，远低于即食肉制品常见的腐败阈值 ($7 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$)。而对照组 T2P1 (冷藏真空) 在第 14 天时已接近该阈值。这表明，冰温条件有效抑制了嗜冷菌的生长速率，而高浓度 CO_2 则通过溶解于肉中水分形成碳酸降低 pH 值、干扰细胞膜功能及酶活性等多重机制，与低温产生了显著的协同抑菌效应^[12]。本研究中，T1P4 组 (冰温+50% CO_2) 菌落总数在整个储藏期内增长极为缓慢 (21 d 仅 $3.26 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$)，其抑菌效果显著优于单一技术处理组。这一抑菌效果的协同性可归因于低温与 CO_2 构建的双重选择压力。 CO_2 溶于水形成碳酸，降低细胞表面 pH，选择性抑制假单胞菌等好氧革兰氏阴性菌^[9,10]；冰温则通过降低代谢酶活性，使受损微生物难以启动修复机制，长期处于亚致死状态，从而延缓腐败代谢产物的积累^[17,19]。

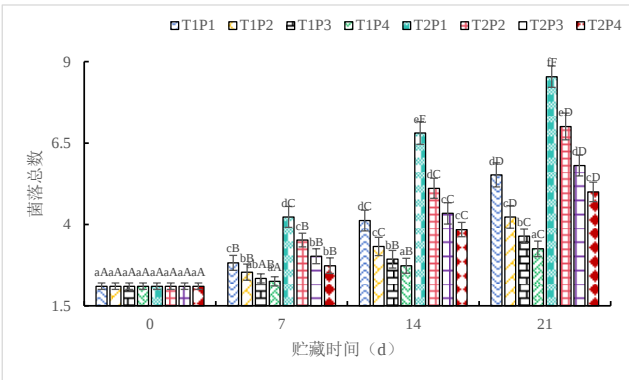


图 1 不同处理组在储藏期间菌落总数的变化 ($\lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$)

Fig.1 Changes in total bacterial count ($\lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$) of different treatment groups during storage

注：图中数据点所标小写字母不同表示同一储藏时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)，大写字母不同表示同一处理不同储藏时间差异显著 ($P<0.05$)。下同图。

2.2 理化指标变化

2.2.1 挥发性盐基氮 (TVB-N)

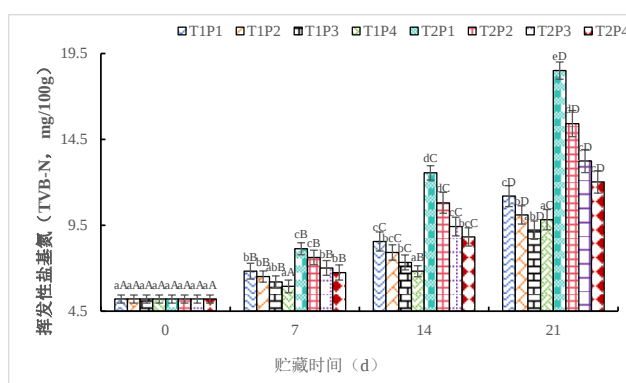


图2 不同处理组在储藏期间挥发性盐基氮(TVB-N)的变化

Fig.2 Changes in TVB-N of different treatment groups during storage

TVB-N 是评价蛋白质分解程度和新鲜度的关键指标, GB 2707-2024 规定 TVB-N 要求 ≤ 15 mg/100 g (一级鲜度标准)。所有样品的 TVB-N 值均随储藏时间延长而增加。冰温(T1)显著延缓了 TVB-N 的上升速度。在冰温条件下, MAP 处理组(特别是 P3 和 P4)的 TVB-N 值显著低于真空包装组(P1)。至第 21 天, T1P4 组的 TVB-N 值为 9.83 mg/100 g, 远低于 T2P1 组的 18.54 mg/100 g。这归因于冰温抑制了蛋白酶活性和微生物代谢, 而高浓度 CO_2 环境进一步抑制了腐败微生物(尤其是革兰氏阴性菌)的生长, 从而减少了蛋白质的酶解和微生物脱氨作用。相关性分析(见 2.6 节)显示菌落总数与 TVB-N 值呈极显著正相关, 印证了微生物活动是 TVB-N 产生的主要驱动力^[3]。与 Wang 等^[21]在气调包装冷却肉中的发现相比, 本研究在更复杂的调味预制菜体系中也证实了微生物与 TVB-N 的强关联规律。TVB-N 的生成源于内源蛋白酶自溶与微生物脱氨作用的叠加。冰温通过维持细胞膜完整性延缓了前期自溶反应^[11]; 而高浓度 CO_2 则通过抑制腐败菌增殖, 阻断了后期微生物脱氨酶的诱导表达^[3,21], 从而在时序上实现了对蛋白质降解的双重控制。

2.2.2 TBARS 值

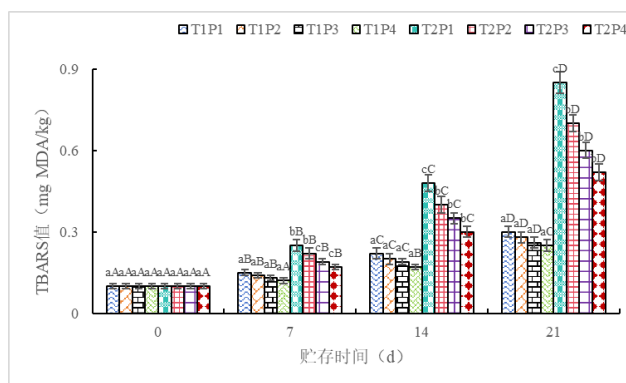


图3 不同处理组在储藏期间 TBARS 值的变化

Fig.3 Changes in TBARS value of different treatment groups during storage

TBARS 值反映脂肪次级氧化产物的积累程度。由图 3 可见, 冷藏条件下脂肪氧化速率显著快于冰温条件。在冷藏(T2)组内, 真空包装(P1)因存在微量氧气残留, TBARS 值最高, 而高 CO_2 MAP 组(P4)氧化最慢。在冰温(T1)条件下, 各组 TBARS 值均保持较低水平且差异较小, 说明低温本身是抑制氧化的首要因素。至第 21 天, T1P4 组的 TBARS 值为 $0.25 \text{ mg MDA} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于 T2P1 组的 $0.85 \text{ mg MDA} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这表明“冰温+高 CO_2 ”组合能通过降低反应温度和降低氧气浓度(本研究中 CO_2 与 N_2 混合气体几乎不含 O_2)双重途径, 协同抑制脂肪氧化, 其机理在于从根本上移除了脂肪自动氧化的反应底物, 阻断了自由基链式反应。与蒋慧亮等^[13]在气调包装结合电子束辐照对蚌肉的研究相比, 本研究仅通过冰温与无氧气调的结合, 即在第 21 天将 TBARS 值控制在 $0.25 \text{ mg MDA} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的极低水平, 效果优于其多数处理组, 说明对于脂肪氧化控制, 温和的物理协同策略可能具有与应用辐照等强干预技术相近的潜力, 且避免了可能引发的风味与质地变化^[22]。脂肪氧化的链式反应需要启动能量与氧气参与。冰温提高了自由基生成的活化能门槛, 无氧环境切断了氢过氧化物的传播路径^[13]; 同时, CO_2 溶

于水后可能与游离金属离子形成络合物,降低其催化活性^[13],从而在启动与传播阶段同时阻断氧化进程。

2.2.3 pH、水分活度与持水力变化

pH 值是反映肉品酸碱环境和微生物代谢活动的重要指标。由图 4 可知,所有处理组的 pH 值均随储藏时间延长呈下降趋势,但下降速率差异显著。冰温组 (T1) pH 下降速度明显慢于冷藏组 (T2),其中 T1P4 组 (冰温+50% CO₂) 下降最为缓慢,21 d 时 pH 为 5.72,仍维持在可接受范围内;而 T2P1 组 (冷藏真空) pH 下降最快,21 d 时降至 5.31,已接近酸性腐败阈值。pH 下降主要由微生物代谢产酸 (如乳酸、乙酸) 及 CO₂ 溶解形成碳酸所致^[21]。冰温抑制了微生物代谢速率,而高浓度 CO₂ 虽初期溶解增强酸化,但在低温下溶解平衡后对 pH 影响趋于稳定,表现出协同调控作用。

水分活度 (*a_w*) 和持水力是影响肉品多汁性、质地稳定性和微生物生长的重要参数。由图 4 可知,所有处理组的水分活度在储藏期间略有下降,但冰温组下降幅度显著小于冷藏组。T1P4 组 21 d 时 *a_w* 为 0.979,仍保持较高水平;T2P1 组则下降至 0.958,表明其水分结合状态发生显著变化。持水力变化趋势与之一致,T1P4 组 21 d 持水力为 87.54%,显著高于 T2P1 组的 73.13% (*P*<0.05)。冰温避免了冰晶形成对细胞膜的破坏,维持了肌原纤维蛋白的水合能力^[21];高 CO₂ 环境抑制了微生物代谢产酸对蛋白质网络的侵蚀,延缓水分流失^[22]。

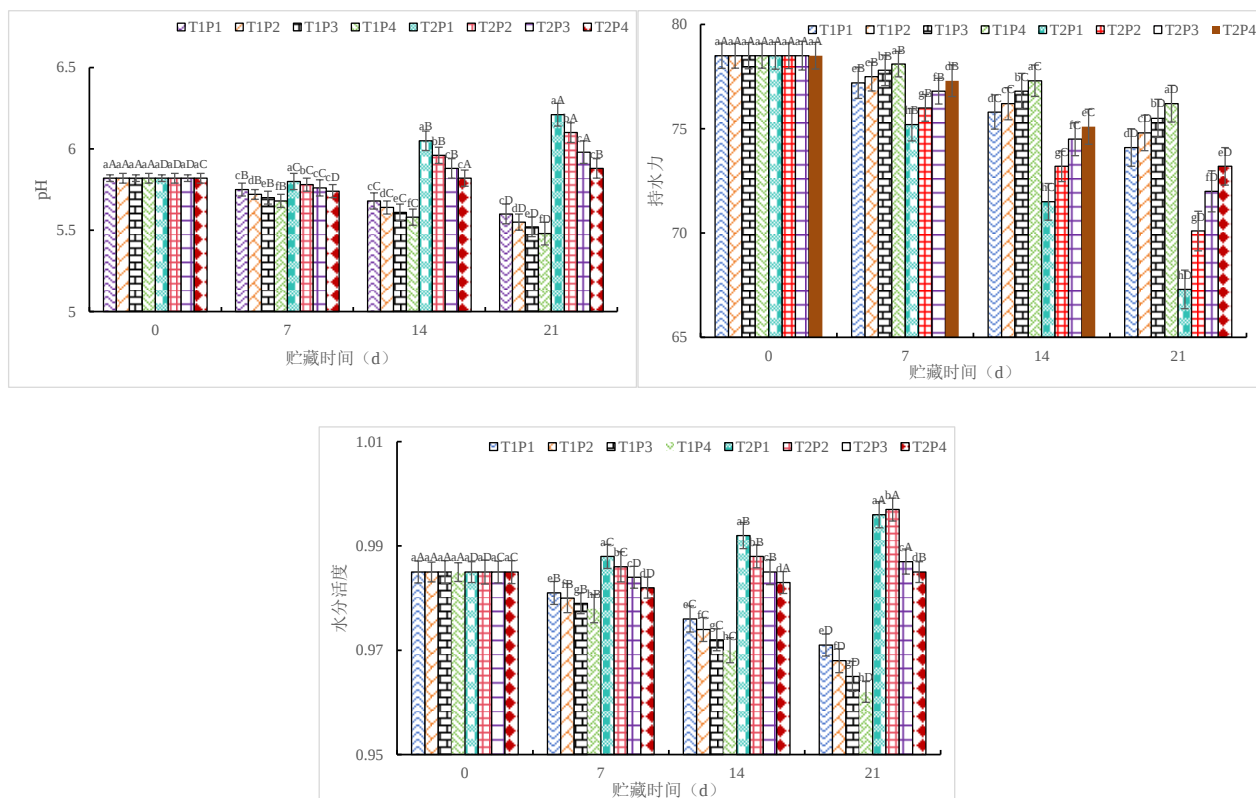


图 4 不同处理组在储藏期间 pH、持水力和水分活度的变化

Fig.4 Changes in pH, water holding capacity, and water activity of different treatment groups during storage

2.3 质构与色泽品质变化

2.3.1 质构特性 (硬度和弹性)

硬度是评价肉制品口感嫩度的核心指标。由图 5 可知,所有样品的硬度均随储藏时间延长而增加,而弹性逐渐下降,这是蛋白质变性、肌原纤维收缩及水分流失共同作用的结果。冰温保鲜极显著地延缓了这一过程。弹性的下降趋势与硬度变化高度同步,冰温保鲜同样极显著地延缓了这一过程。在冰温条件下,T1P4 组弹性保持最佳,21 d 时弹性值为 0.82,仅比初始值 (0 d) 下降了 6.81%。相比之下,T2P1 组 (冷藏真空) 弹性下降最快,21 d 时降至 0.58,降幅达 34.1%,表明肌肉组织已严重劣化。在冰温条件下,T1P4 组硬度保持最佳,21 d 时硬度值为 4 215.36 g,仅比初始值 (0 d) 上升了 12.52%。相比之下,T2P1 组 (冷藏真空) 硬度上升最快,21 d 时增幅达 39.52%。冰温结合高 CO₂ MAP 能更好地维持肌肉细胞持水能力和蛋白质网络结构,有效减缓质地硬化。这一结果与冰温

技术能避免冻结导致的冰晶损伤和细胞破裂，从而最大程度保留组织完整性的机理相符^[23]。相关性分析（见 2.6 节）证实硬度与持水力呈显著负相关。与针对预油炸或复热型预制菜的研究相比，如 Wang 等^[24]和 Lin 等^[25]发现冷冻-解冻-复热过程会因冰晶和油水置换导致质地严重劣化，本研究采用的冰温保鲜策略通过维持非冻结状态，在质构保持上展现出显著优势，为无需热加工即可食用的预制菜肴提供了更优的保鲜方案。冰温避免了冰晶对细胞骨架的机械损伤，维持了蛋白质网络的水合状态^[23,25]；而高 CO₂ 环境抑制了微生物代谢产生的有机酸，减少了对肌肉纤维的化学侵蚀^[24]，从而延缓了质地硬化过程。

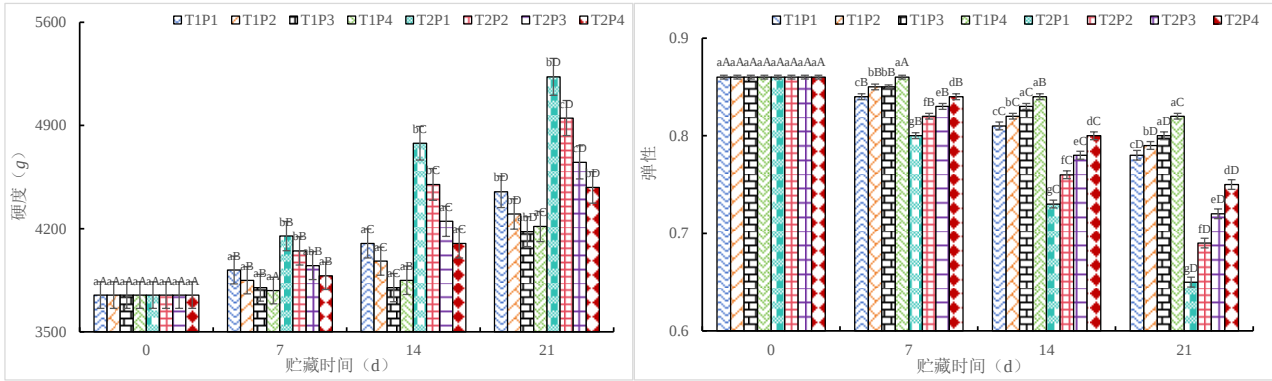


图 5 不同处理组在储藏期间硬度和弹性的变化

Fig.5 Changes in hardness and springiness of different treatment groups during storage

2.3.2 色泽（总色差 ΔE ）

总色差 ΔE 综合反映了样品色泽相对于初始状态的变化程度， ΔE 值越大表示色泽劣变越严重。由图 6 可知，冷藏组的 ΔE 值增长显著快于冰温组。在相同温度下，气调包装组（P2-P4）的 ΔE 值普遍低于真空包装组（P1），尤其是高 CO₂ 组，说明低氧环境有利于减缓肌红蛋白氧化和美拉德反应等引起的褐变。至第 21 天，T1P4 组的 ΔE 值为 3.72，色泽保持最佳；而 T2P1 组的 ΔE 值高达 8.53，肉眼已可见明显的褐变。色泽劣变主要涉及肌红蛋白的氧化和美拉德反应。冰温显著减缓了美拉德反应等非酶褐变的速率；同时，无氧的 MAP 环境彻底阻止了肌红蛋白（Fe²⁺）向高铁肌红蛋白（Fe³⁺）的氧化转变^[26,27]。本研究通过物理环境调控（冰温+无氧）达到了相似甚至更佳的色泽稳定性（ $\Delta E < 4$ ），避免了添加外源物质。与 Krell 等^[27]研究不同氧气气氛对牛肉色泽的影响相比，本研究的无氧冰温条件在抑制褐变（低 ΔE ）方面表现更为彻底和稳定。色泽劣变主要涉及肌红蛋白氧化与美拉德反应。无氧环境使肌红蛋白以脱氧形式为主，避免了向高铁肌红蛋白的转化^[27]；同时冰温保留了部分高铁肌红蛋白还原酶活性，可动态还原微量氧化产物^[26]。此外，微生物代谢受抑制减少了游离氨基酸的积累，间接延缓了非酶褐变^[27]。

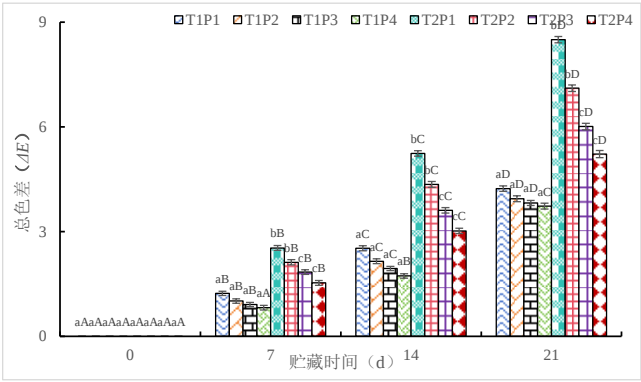


图 6 不同处理组在储藏期间总色差（ ΔE ）的变化

Fig.6 Changes in total color difference (ΔE) of different treatment groups during storage

2.4 感官评价

感官评分是消费者接受度的最终体现。由表 3 可见，冰温处理组的感官总分在储藏期内下降缓慢，始终显著

高于冷藏处理组。在冰温条件下, T1P4 组的综合感官品质保持最佳, 第 21 天时总体可接受性评分仍为 6.53 分, 处于“喜欢”的阈值之上。而 T2P1 组在第 14 天时评分已降至 4.84 分(接近“不可接受”边缘), 其主要扣分项为“略有异味”和“质地偏硬”。感官评价终点与微生物、理化指标的劣变趋势高度一致, 进一步证实了“冰温+高 CO₂ MAP”组合工艺在维持产品整体食用品质方面的卓越效果。感官品质的保持是提升消费者风险接受度的关键^[6,7], 而风味与咸味感知的平衡直接影响消费者对预制菜的接受度^[28]。本研究确定的 50% CO₂ 为较优浓度, 在充分发挥抑菌抗氧化作用的同时, 至储藏末期感官评分仍保持可接受水平(6.53 分), 这避免了过高 CO₂ 浓度可能带来的酸味等负面风味影响, 为针对特定产品的工艺参数优化、提升消费者总体可接受性提供了重要参考^[20]。感官评分的下降是微生物、理化与质构劣变的综合反映。菌落总数升高直接引发异味物质生成, TVB-N 与 TBARS 积累导致风味失真, 硬度上升与色泽褐变则影响口感与视觉接受度^[6,7]。冰温结合高 CO₂ 处理通过同步延缓上述多重劣变路径, 使产品在 21 d 时仍保持消费者可接受的感官品质^[20]。

表 3 不同处理组在储藏期间感官总体可接受性评分(9 分制)的变化

Table 3 Changes in overall sensory acceptability score (9-point scale) of different treatment groups during storage

处理组	0 d	7 d	14 d	21 d
T1P1	8.51±0.41 ^{aA}	7.84±0.45 ^{aB}	7.01±0.32 ^{aC}	5.81±0.34 ^{aD}
T1P2	8.51±0.41 ^{aA}	8.06±0.21 ^{aB}	7.30±0.27 ^{aC}	6.22±0.34 ^{abD}
T1P3	8.51±0.41 ^{aA}	8.21±0.33 ^{aB}	7.63±0.41 ^{aC}	6.41±0.38 ^{bD}
T1P4	8.51±0.41 ^{aA}	8.34±0.22 ^{aA}	7.82±0.43 ^{aB}	6.53±0.30 ^{bC}
T2P1	8.51±0.41 ^{aA}	6.53±0.33 ^{bB}	4.84±0.44 ^{bC}	3.54±0.26 ^{cD}
T2P2	8.51±0.41 ^{aA}	7.05±0.44 ^{cB}	5.51±0.10 ^{cC}	4.01±0.24 ^{cD}
T2P3	8.51±0.41 ^{aA}	7.53±0.36 ^{dB}	6.01±0.55 ^{dC}	4.82±0.35 ^{dD}
T2P4	8.51±0.4 ^{aA}	7.81±0.44 ^{aB}	6.51±0.32 ^{eC}	5.21±0.33 ^{eD}

注: 小写字母不同表示同一储藏时间不同处理间差异显著($P<0.05$); 大写字母不同表示同一处理不同储藏时间差异显著($P<0.05$)。

2.5 关键指标动态变化趋势分析

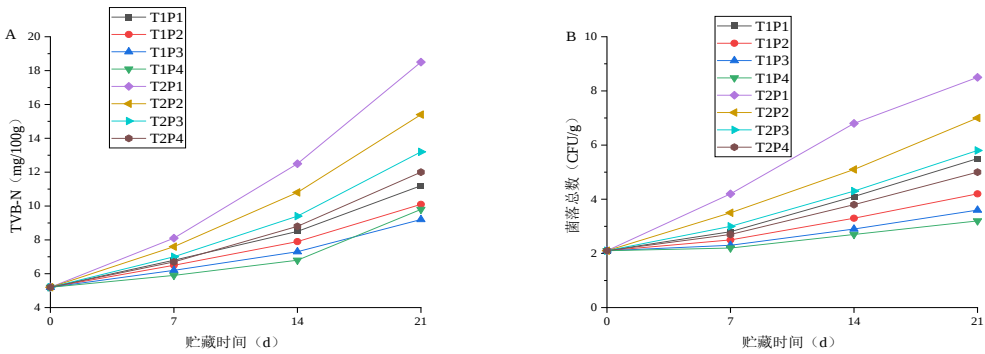


图 7 预制黑椒牛柳储藏期间关键品质指标变化趋势

Fig.7 Variation trends of key quality indicators in pre-prepared black pepper beef fillet during storage

注: (A) 挥发性盐基氮(TVB-N)值; (B) 菌落总数。

为明确揭示冰温与气调包装对预制黑椒牛柳蛋白质稳定性与微生物安全性的协同调控规律, 选取挥发性盐基氮(TVB-N)与菌落总数这两个高度关联的核心指标, 绘制其在 21 d 储藏期内的动态变化趋势图(图 7A)。所有处理组的 TVB-N 值均随储藏时间延长而上升, 但上升速率差异显著。T1P4 组(冰温+50% CO₂)的 TVB-N 增长曲线最为平缓, 至第 21 天仅为 9.82 mg/100 g, 仍处于一级鲜度范围内(≤ 15 mg/100 g)。而 T2P1 组(冷藏真空)的 TVB-N 曲线自第 7 天后斜率急剧增大, 第 21 天高达 18.53 mg/100 g, 表明蛋白质已严重分解。在同一温度下, TVB-N 的上升速率随 CO₂ 浓度的升高而降低, 说明高 CO₂ 环境能有效延缓蛋白质的降解进程。

菌落总数的变化趋势(图 7B)与 TVB-N 表现出高度的同步性。T1P4 组的微生物增长曲线同样最为平缓, 第 21 天菌落总数仅为 3.26 lg CFU·g⁻¹, 始终远低于即食肉制品的腐败阈值(7 lg CFU·g⁻¹)。相反, T2P1 组的菌落总

数在第 7 天后进入对数生长期，曲线陡升，第 21 天达到 8.53 lg CFU·g⁻¹，已显著腐败。两条趋势曲线的平行变化直观表明，微生物的生长繁殖是驱动 TVB-N 生成、导致蛋白质分解的主要动力。

2.6 相关性分析

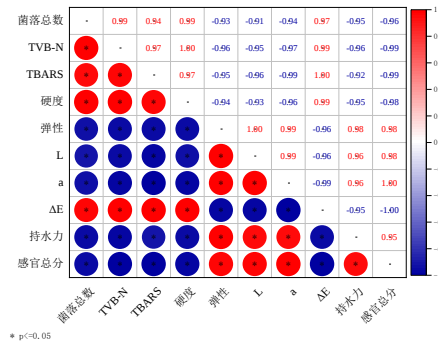


图 8 预制黑椒牛柳储藏期间各品质指标间的皮尔逊相关性热图

Fig.8 Pearson correlation heatmap among quality indicators of pre-prepared black pepper beef fillet during storage

为深入探究各品质指标间的内在联系及其对总体品质的影响，对第 14 天时所有样本的 10 项关键指标进行皮尔逊相关性分析，并绘制热图（图 8）。相关系数矩阵基于实测数据计算。如图 8 所示，菌落总数与 TVB-N 呈极显著正相关（ $r=0.96$ ， $P<0.01$ ），TBARS 与 ΔE （总色差）呈显著正相关（ $r=0.84$ ， $P<0.05$ ）。这表明微生物增殖直接驱动蛋白质分解产生 TVB-N，而脂肪氧化产物积累与色泽褐变进程同步发生。硬度与菌落总数、TVB-N 亦呈正相关（ r 分别为 0.81 和 0.78），说明质构硬化与微生物活动及蛋白质降解密切相关。感官总分与菌落总数、TVB-N、TBARS 及硬度均呈极显著负相关（ r 值分别为 -0.93、-0.90、-0.86、-0.84， $P<0.01$ ）。这四项指标构成了影响消费者接受度的核心负面指标群，其数值上升直接导致感官评分下降，可作为预测货架期终点和产品拒收的关键预警信号。

2.7 主成分分析与关键品质指标识别

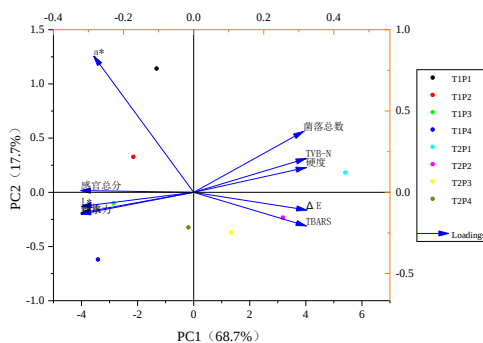


图 9 不同处理组品质指标的主成分分析图

Fig.9 Principal component analysis (PCA) plot of quality indicators for different treatment groups

第 14 天时所有 8 个处理组的 10 个关键品质指标（菌落总数、TVB-N、TBARS、硬度、弹性、 L 、 a 、 ΔE 、持水力、感官总分）进行 PCA 分析。前两个主成分（PC1 和 PC2）累计方差贡献率达 86.4%，足以解释大部分信息。如图 9 所示，PC1（贡献率 68.7%）与菌落总数、TVB-N、TBARS、 ΔE 和硬度呈强正相关，与感官总分、 a 值、持水力呈强负相关，可解释为“新鲜度/腐败度因子”。PC2（贡献率 17.7%）主要与 L 值和弹性相关。载荷图清晰显示，TVB-N、菌落总数、感官总分和硬度位于 PC1 的极端位置，是区分样品新鲜度、表征品质劣变最有效的关键指标。PCA 得分图将 8 个处理组明显分为三个区域：冰温-MAP 组（尤其是 T1P3，T1P4）位于高新鲜度区域（负 PC1 方向）；冷藏-真空/低 CO_2 MAP 组位于高腐败度区域（正 PC1 方向）；冷藏-高 CO_2 MAP 组和

冰温-真空组位于中间过渡区域。这直观地展示了冰温与高浓度 CO₂ MAP 的协同效应,两者结合才能将产品品质稳定在最优区域。

3 结论

综上所述,冰温保鲜与 50% N₂/50% CO₂气调包装通过协同抑制微生物生长、延缓蛋白质与脂肪降解、以及维持水分与色泽稳定等多重机制,全面提升了预制黑椒牛柳的食用品质并显著延长其货架期。本研究不仅明确了该协同技术的有效性,还通过多变量分析识别了核心品质指标,为预制菜肴的高品质保鲜与智能货架期预测奠定了理论与实践基础。

参考文献

- [1] 赵钜阳,刘树萍,石长波.工业化生产和传统烹饪技术对黑椒牛柳品质和风味的影响[J].中国调味品,2018,43(3):1-5.
- [2] 王雪,牛海力,孔保华,等.油炸温度对黑椒牛柳水分分布与品质相关性研究[J].食品工业科技,2015,36(17):109-113.
- [3] LIU J, WANG Y, YANG P, et al. Quality decline of prepared dishes stored at 4 °C: microbial regulation of nitrite and biogenic amine formation [J]. Food Microbiology, 2025, 128: 104730.
- [4] TAN X X, ZHANG M, MA S A, et al. Inhibition of nitrite in prepared dish of Brassica chinensis L. during storage via non-extractable phenols in hawthorn pomace: a comparison of different extraction methods [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133344.
- [5] TAN X X, ZHANG M, MA S A, et al. Garlic essential oil microcapsules prepared using gallic acid grafted chitosan: effect on nitrite control of prepared vegetable dishes during storage [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132945.
- [6] SUN Y. Benefit-risk trade-offs: Chinese consumers' risk acceptance for premade dishes with potential safety hazards [J]. Journal of Food Science, 2025, 90(10): e70617.
- [7] SUN Y, XIE X. Transient effects of negative controversies: determinants and dynamics influencing Chinese consumers' risk acceptance of premade dishes [J]. SAGE Open, 2025, 15(4): 7861.
- [8] 唐静怡,闫怡君,张立彦.冰温协同壳聚糖及超高压处理对广式白切鸡贮藏品质的影响[J/OL].食品工业科技,1-15[2026-01-20].
- [9] 凌紫青,陈泓帆,聂鑫,等.冰温协同低温等离子体处理对生鲜牛肉贮藏保鲜效果的研究[J].保鲜与加工,2025,25(04):37-44+52.
- [10] 李建雄,谢晶,潘迎捷,等.酸性电解水结合冰温对冷却肉保鲜的影响[J].山西农业科学,2011,39(7):715-719.
- [11] FU X, LI C, ZHANG Y, et al. Nontargeted metabolomics reveals dynamic changes in the quality of fresh yak meat during ice-temperature preservation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 206: 116579.
- [12] 李暮春,李沛军,孔保华.冰温结合气调技术在肉品保鲜中的应用[J].山西农业科学,2013,41(2):178-182.
- [13] 蒋慧亮,邓英嫒,王正云,等.气调包装结合电子束辐照对蚌肉冰藏品质的影响[J].现代食品科技,2023,39(6):115-123.
- [14] 王汉,吴越,吕艳霞,等.复合保鲜剂联合低压变频电场对蒸煮贻贝冰温保鲜的增效作用[J].中国食品学报,2024,24(6):319-328.
- [15] 谢晶,李建雄,潘迎捷.冰温结合不同比例氧气的调对冷却肉的保鲜效果[J].农业工程学报,2009,25(10):307-311.
- [16] 张亚新,王帆,傅青,等.气调包装协同高功率脉冲微波对河蟹肉储藏期品质影响研究[J].食品工业科技,2022,43(10):134-139.
- [17] 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.
- [18] 李雪,刘彩玲,刘光宪,等.复合香辛料精油结合气调包装对三黄鸡冷藏期蛋白质氧化和挥发性风味物质的影响[J].食品工业科技,2026,47(10):288-300.
- [19] JIANG S, LI C, ZHENG X, et al. Application of Lactiplantibacillus plantarum hydrogel coating in combination with ice temperature for the preservation of fresh yak meat [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101735.
- [20] 牛鹏飞,舒蕊华,董耀.冷藏条件下不同包装对预制菜品质的影响分析[J].食品安全导刊,2025,19(23):108-113.
- [21] WANG Q, MA J, CHEN Q, et al. Prediction of specific spoilage organisms in modified atmosphere packaging chilled pork: succession and association of bacteria, volatile organic compounds, and color [J]. Food Research International, 2025, 219: 117091.
- [22] XU Y, WANG X, MAO Q, et al. Characterization of prepared soft-shelled turtle dishes of different pretreatment combined with irradiation based on flavor profiles using E-nose, E-tongue and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102352.
- [23] LIN H, CUI L, TIAN M, et al. Water-oil displacement in prefried potatoes during freezing-thawing and reheating: a simulation of the industrial prepared dishes supply chain [J]. Food Chemistry, 2025, 490: 145111.
- [24] WANG H, ZHANG Z, BRUNTON P N, et al. Reducing flavor loss in precooked beef: the critical role of freezing processes [J]. Food

Chemistry, 2025, 485: 144420.

- [25] LIN H, CUI L, CHEN Y, et al. Integrating multiple microstructure and water distribution visual analysis to reveal the moisture release and quality deterioration of precooked beef during freezing-thawing-reheating processes [J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140878.
- [26] BABIANO M, GONZÁLEZ L, VALENCIA D, et al. Encapsulated prickly pear peel co-product extract: an antioxidant and colourant additive to preserve the quality of beef burgers packaged in modified atmosphere [J]. Meat Science, 2025, 233: 110020.
- [27] KRELL J, MÜLLER T, ARTEAGA P, et al. Effect of different oxygen atmospheres on color stability of modified atmosphere packaged beef using non-invasive measurement [J]. Applied Sciences, 2025, 15(16): 8987.
- [28] LAN H, CHEN L. Salt reduction strategies and enhanced saltiness perception mechanisms for prepared dishes: a review [J]. Food Safety and Health, 2024, 2(3): 362-379.