赵伟焱, 曹传爱, 刘骞. 低温慢煮时间对即食鸡肝品质特性及其微观结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 157−166. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030221

ZHAO Weiyan, CAO Chuan'ai, LIU Qian. Effects of Sous-vide Time on the Quality Characteristics and Microstructures of Ready-to-eat Chicken Liver[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 157−166. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030221

· 研究与探讨 ·

低温慢煮时间对即食鸡肝品质特性及其微观结构的影响

赵伟焱, 曹传爱, 刘　骞*

（东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030）

摘　要: 为解决即食鸡肝在传统高温加工中存在的品质劣化、口感下降等问题，本实验利用低温慢煮技术对即食鸡肝进行处理，研究其工艺参数对即食鸡肝的品质及微观结构的改善效果。本实验主要探究在 80 ℃ 下不同低温慢煮时间（40、45、50、55、60 min）对即食鸡肝蒸煮损失、水分含量、水分活度、色泽、pH、剪切力、质构特性、电子鼻、二级结构、微观结构以及感官评价的影响。研究表明，随着蒸煮时间的延长，低温慢煮处理组鸡肝的蒸煮损失和 pH 显著上升，水分含量、水分活度、L^*值和 a^*值呈显著下降的趋势（P<0.05）。同时，鸡肝的嫩度呈先下降后上升的趋势，而质构特性及感官评分随处理时间的增加呈先上升后下降的趋势（P<0.05），且与对照组相比，在处理时间为 55 min 时具有最佳的品质特性。红外光谱结果表明，蛋白质二级结构随着处理时间的延长由 α-螺旋向 β-折叠构象转变（P<0.05）。此外，适当的低温慢煮时间（55 min）有利于鸡肝呈现更加有序致密的网状结构。综上所述，80 ℃、55 min 条件为即食鸡肝的最佳低温慢煮工艺。本文为低温即食鸡肝工业化生产以及品质提升提供了一定的技术支持，并为畜禽副产物综合利用提供了新方向。

关键词: 低温慢煮, 鸡肝, 品质, 二级结构, 微观结构

中图分类号: TS251.6+1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)02−0157−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030221　　本文网刊:

Effects of Sous-vide Time on the Quality Characteristics and Microstructures of Ready-to-eat Chicken Liver

ZHAO Weiyan，CAO Chuan'ai，LIU Qian*

（College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China）

Abstract: To address the problems of quality deterioration and taste decline associated with traditional high-temperature processing of ready-to-eat chicken liver, this study employed sous-vide technology to improve product quality. The effects of processing parameters on the quality characteristics and microstructure of chicken liver were systematically investigated. Particularly, the influence of different sous-vide durations (40, 45, 50, 55, and 60 min) at 80 °C on various quality indicators, including cooking loss, moisture content, water activity, color, pH, shear force, texture characteristics, electronic nose analysis, secondary structure, microstructure, and sensory attributes was examined. The results demonstrated that with increasing cooking time, the cooking loss and pH of chicken liver samples in the sous-vide group increased significantly, whereas the moisture content, water activity, and L^* and a^* values decreased significantly (P<0.05). The tenderness of the chicken liver initially decreased and then increased, whereas texture characteristics and sensory scores first increased and then decreased with extended processing time (P<0.05). Compared with the control group, the optimal processing time was determined to be 55 min, yielding the best overall quality. Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy revealed that the secondary protein structure shifted from α-helix to β-sheet with longer processing times (P<0.05). Furthermore, an

收稿日期: 2025−03−17

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目（2023M740572）; 黑龙江省博士后面上项目（LBH-Z23073）; 黑龙江省自然科学基金项目（LH2024C030）。

作者简介: 赵伟焱（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: 17698321998@163.com。

*** 通信作者:** 刘骞（1981−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: liuqian@neau.edu.cn。

appropriate sous-vide duration (55 min) promoted a more orderly and compact reticular microstructure in the chicken liver. In conclusion, the optimal sous-vide process for ready-to-eat chicken liver, at 80 °C for 55 min. This paper provides certain technical support for the industrial production and quality improvement of low-temperature ready-to-eat chicken liver, and provides a new direction for the comprehensive utilization of livestock and poultry by-products.

Key words: sous-vide; chicken liver; quality; secondary structure; microstructure

随着肉制品加工行业的发展，我国畜禽类肉制品发展迅速，相应的畜禽类副产物也逐渐受到大众关注。畜禽副产物包括内脏、骨、皮、血等种类，含有丰富的蛋白质、矿物质等营养成分[1]。截至目前，中国畜禽副产品年产量高达 1200 多万吨，占世界产量的 1/3。然而我国对副产物的整体利用率低于 5%[2]。在畜禽副产物高产量的背景下，将其进行综合利用可以有效提高畜产品附加值，具有非常可观的社会经济效益[3]。目前我国消费市场中畜禽副产物肉制品大多都是经过高温工艺（加工温度在 100 ℃ 以上，加热时间在 20~30 min）。制作过程中会产生蛋白质高温变性、营养物质大量损失、肉质口感糟烂等缺点，还会出现高温蒸煮味[4]，无法保留其原有的鲜嫩多汁的初态。因此开展新型即食副产物食品的低温加工研究具有深远的经济价值和发展前景。

低温慢煮技术（Sous-vide，SV）是一种基于精准控温的食品加工方式，通过将原料密封后置于恒温水浴设备中，以低于传统烹饪的温度（通常 55~85 ℃）进行长时间热处理。相较于大众熟知的传统高温煮制而成的肉制品，SV 技术直到 2010 年才逐渐进入我国肉制品研究领域，属于新型肉制品加工技术[5]。SV 由于加热温度低且稳定、受热均匀等特点，可以大大提高产品的保水性，并且能降低产品蛋白质变性程度，使内部细胞形态尽可能保持完整，赋予产品多汁的口感，更加符合目前大众对于食品健康的新要求。刘欣睿等[5] 比较传统煮制与 SV 对鸡胸肉品质的影响，结果发现 SV 组的产品具有较好的持水能力，且在微观结构上肌纤维整齐有序，结构紧密。周寅涛等[6] 研究发现，与传统煮制加工进行对比，SV 加工可增加中华管鞭虾的感官评分，并且更好保留水溶性蛋白质与原始风味。与此同时，SV 技术相较于高温蒸煮更加温和，可有效减少肉类加工时杂环胺等致癌物质的生成。SV 可限制大部分需氧细菌的生长，确保食品卫生安全的同时延长食品货架期[5]。Zavadlav 等[7] 研究表明，当 SV 温度高于 70 ℃ 时，处理超过 2 min 可有效杀灭病原菌芽孢以确保食品加工的安全性。Singh 等[8] 通过优化即食马皎鱼片的 SV 工艺参数，证明产品在 4 ℃ 冷藏条件下贮藏 65 d 后，其理化特性、微生物总数及感官品质均符合食品安全标准，表明 SV 技术具备工业化生产的安全可靠性。值得注意的是，现有研究多聚焦牛肉、鸡胸肉等主流肉品，而对畜禽副产物（如鸡肝、鸭胗等）的加工适配性研究仍存在空白，这既制约了副产物高值化利用，也限制了 SV 技术在我国特色畜禽资源开发中的纵深应用。

本实验选用即食鸡肝作为实验对象，研究低温慢煮时间对即食鸡肝品质特性及其微观结构的影响。首先，测定样品的蒸煮损失、水分含量、pH、色差、剪切力、质构、电子鼻以及蛋白二级结构，探究低温慢煮时间对即食鸡肝品质的影响。然后，通过扫描电镜分析低温慢煮时间对即食鸡肝微观结构的影响。通过以上研究，为低温加工畜禽副产物提供理论支持与操作规范，并为畜禽副产物综合利用提供新方向。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜鸡肝　舒兰市盛美牧业有限公司；食盐　中国盐业集团有限公司；复合磷酸盐（焦磷酸盐、三聚磷酸盐、六偏磷酸盐 1∶1∶1 等比例混合）　厦门市顶为味兴业香料发展有限公司；去腥剂　南宁恒华道生物科技有限公司；香辛料　四川川珍实业有限公司；葱姜蒜粉　江苏味太美食品有限公司；黄酱　营口海纳食品有限公司；真空密封袋　东莞新润隆包装材料有限公司。

CREATIVECHEF 商用 SV2300 低温慢煮机　西班牙 Creativechef 公司；JD500-2 电子天平　郑州南北仪器设备有限公司；S-3400N 型电子扫描电镜、S-3400N 型扫描电镜　日本 HITACHI 公司；TA-XT Plus 型质构分析仪　英国 Stable Micro Systems 公司；ZE-600 色差计　日本色电工业株式会社；GL-21 M 高速冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；TU-1800 紫外可见分光光度计　北京普析仪器公司；PEN3 电子鼻　德国 AIRSENSE 公司；Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪　赛默飞世尔科技（中国）有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鸡肝样品制备　选用两半叶状完整，颜色紫红，形态饱满无缺损的鸡肝，并清洗干净。然后，将清理后的鸡肝与去腥剂（0.3%w/w，以鸡肝总重计）混合，放入真空搅拌按摩机中，采用间歇式真空动态处理工艺，将物料置于密闭滚揉机内操作。关键工艺参数设定为：真空度 99 kPa，时长 30 min，滚揉温度控制在 4±2℃ 范围内，通过 40 Hz 变频驱动，10 min 动态滚揉与 5 min 静态渗透交替。

按鸡肝总重量配比卤料，其中食盐添加量为 2%，清水 100%，葱粉、姜粉、蒜粉各 0.5%，黄酱 5%，大料、花椒、桂皮、茴香、丁香各 0.15%，w/w。将上述配料依次投入锅中，大火煮沸后保持 30 min 熬制，

自然冷却后备用。

将鸡肝放入卤液并浸泡 2 h 后捞出，装入真空包装袋（每袋 150 g），排出空气后用封口机封口，全部浸入低温慢煮机中于 80 ℃ 进行煮制，煮制 40、45、50、55、60 min 时依次取出样品，分别命名为 SV80-40、SV80-45、SV80-50、SV80-55、SV80-60，4 ℃ 下快速冷却，待用。对照组采用 100 ℃ 高温加热 30 min，其余工艺条件及试验配方与实验组保持一致。

1.2.2　蒸煮损失的测定　参考 Cao 等[9] 对样品的蒸煮损失（%）测量方法，首先煮制前擦干样品表面水分，称重（M_1，精确到 0.0001 g）。然后，将样品进行煮制，冷却至室温，擦干表面水分后称重（M_2，精确到 0.0001 g）。根据煮制前后鸡肝重量之差计算样品的蒸煮损失，公式如下：

$$蒸煮损失(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

1.2.3　色差的测定　每个样品的颜色亮度（L^*）、红度（a^*）和黄度（b^*）值的差异根据 Kong 等[10] 的测量方法进行评估并稍作调整。首先将样品切碎成带棱角的小颗粒状，称取 2.0 g 置于 ZE-6000 色度计上，配备 D65 光源，直径为 8 mm 的测量区，直径为 50 mm 的照明区，观测器角度 10°，光照区域直径 5 cm，分析颜色变化。

1.2.4　水分含量的测定　水分含量根据 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》[11] 的相关规定，采用直接干燥法测定。首先将样品置于 4 ℃ 冷库中，放置 12 h 后取出。随后沥干表面水分，将样品搅碎成小颗粒状，并称取 4 g 左右样品置于铝盒（M_3，精确到 0.0001 g）中，随后称重（M_4，精确到 0.0001 g），于 105 ℃ 烘箱中烘干 24 h，称取烘干后样品与铝盒的重量（M_5，精确到 0.0001 g），根据烘干前后鸡肝重量之差计算样品的水分含量，公式如下：

$$水分含量(\%) = \frac{M_4 - M_5}{M_4 - M_3} \times 100$$

1.2.5　水分活度的测定　根据李龙祥等[12] 的测量方法，首先将水分活度仪打开并预热 20 min，然后称取一定量的搅碎的样品，平铺于水分活度测量皿内至平皿底层不透光。随后将平皿放入机器内的样品池中进行测量，记录样品的水分活度，每组样品平行测定 3 次。

1.2.6　pH 的测定　参考 Yuan 等[13] 的方法测定样品的 pH。将煮制后的鸡肝沥干表面水分，使用手持式固体酸度测量计并将探测头插入待测样品的中心部位，保持 10~30 s，直到读数稳定，记录此时的 pH 数值。每个样品需进行 6 次重复测量，每次选择 6 个不同的测量点。

1.2.7　剪切力的测定　参照 Hou 等[14] 的方法测定样品的剪切力。首先，将样品切成 1.5 cm×1 cm×1 cm 的小块，然后将剪切刀片直接放在质构分析仪下并使样品垂直于横截面方向剪切，探头型号为 TA/MORS，十字速度为 200 mm/min，试验触发力为 20 g，试验前速率为 5 mm/s，试验速率为 3 mm/s，试验后速率为 10 mm/s，压缩距离为 10 mm。每组样品平行测量 3 次，并做 3 次重复试验。

1.2.8　质构特性的测定　参考 Kim 等[15] 的方法并稍作调整。用质构仪进行质地剖面分析（Texture Profile Analysis，TPA）模式测定。首先，将样品切成 2 cm×2 cm×1 cm 的长方体，测试中记录样品的硬度、咀嚼性、弹性和内聚性。探头型号为 P/50，试验前速度为 2 mm /s，试验后速度为 5 mm /s，压缩比为 50%，触发力为 20 g，每组样品平行测量 3 次，并做 3 次重复试验。

1.2.9　电子鼻的测定　参考赵宏蕾等[16] 的方法，将 3 g 样品置于专用检测瓶中，利用电子鼻进行测试。具体操作条件为：数据采集间隔 1 s，初始准备时间 5 s，系统清洁时间 100 s，气体流速设定为 300 mL/min，单次检测时长为 90 s。该设备配备了 10 种不同的检测单元，其中 W1C 对应苯类物质和芳香组分；W5S 对应氮氧化合物；W3C 对应氨类和芳香组分；W6S 对应氢化物；W5C 对应芳香烯烃和极性化合物；W1S 对应短链烷烃；W1W 对应硫化物；W2S 对应醇类和醛酮类；W2W 对应含硫有机物和芳香组分；W3S 对应长链烷烃。

1.2.10　扫描电镜的测定　参考 Maqsood 等[17] 的方法，稍有改动。样品预处理流程如下：将待测物加工为 5 mm×5 mm×1 mm 标准尺寸，浸入 pH 为 6.8 的 2.5% 戊二醛溶液进行固定处理，4 ℃ 恒温保存 12 h。清洗阶段采用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH7.2）进行三次 10 min 漂洗。样品处理采用逐步脱水法：先用 50% 乙醇处理 10 min，随后分别用 70% 和 90% 乙醇各处理 10 min。接着用纯乙醇进行两次脱水，每次 10 min。在溶剂置换阶段，先用乙醇与叔丁醇等比例混合液处理 15 min，再换用纯叔丁醇处理 15 min。最后，将样品在−20 ℃ 条件下快速冷冻 30 min，再进行冻干处理。制样阶段使用导电胶固定样本后实施金属镀膜，最终采用扫描电镜（工作参数：放大倍数 2000×，加速电压 5.00 kV）进行微观结构观察。

1.2.11　傅里叶变换红外光谱的测定　参照 Sun 等[18] 的方法并稍作修改。首先将样品放入−18 ℃ 冰箱静置 24 h，随后将样品切成薄片放入冻干机，冷冻干燥后研磨，之后将 1 mg 样品与 100 mg KBr 混合，在红外灯下用玛瑙杵和研钵轻轻研磨，然后施加压力 2 min 压成直径 13 mm 的圆饼。之后采用傅里叶变换红外光谱仪测量其红外吸收光谱，扫描范围为 4000~400 cm^{-1}。随后，使用 PeakFit v4.12 软件 1600~1700 cm^{-1} 范围内观察到的酰胺带进行反卷积和曲线拟合，以分析低温即食鸭胸肉中蛋白质的二级结构组成（表示为 α-螺旋，β-折叠，β-转角和无规则卷曲含量）。

1.2.12 感官评价 感官评价根据 Chen 等[19] 的方法稍加修改。感官评价小组由 16 名东北农业大学肉类加工实验室的研究生组成(男女各 8 人,年龄范围 22~25 岁)。所有参与者均经过系统培训,熟练掌握感官分析的操作规范及各项品质指标的评判标准。采用描述性感官分析方法对样品进行评估,测试过程中要求评价员在每次品尝后用清水清洁口腔。评价项目包括色泽、形态、风味、滋味、质地、多汁性、嫩度以及综合评分,采用 7 分制评分系统。评分标准如表 1 所示。

表 1 即食鸡肝感官评价标准

Table 1 Criteria for sensory evaluation of ready-to-eat chicken liver

项目	评分标准	分值(分)
色泽	颜色均匀鲜艳,切面具有明显光泽	6~7
	颜色较为均匀,表面具有自然的光泽	4~5
	颜色不均匀,存在一定色差且切面光泽差	2~3
	完全无光泽,切面光泽黯淡	1
形态	切面平整,组织紧密	6~7
	切面较为平整,形态基本完整	4~5
	切面不平整,边缘松散	2~3
	无完整形态,松散严重	1
气味	气味好,有浓郁酱卤香味,无腥味或异味	6~7
	气味较好,有浓郁酱卤香味,无腥味或异味	4~5
	气味一般,酱卤香味一般,有腥味或异味	2~3
	气味极差,无酱香味,有强烈腥味或异味	1
滋味	滋味极其鲜美,浓郁的肉香在口中四溢	6~7
	比较鲜美,肉香较为突出	4~5
	有一定的肉香但不够浓郁,味道较为平淡	2~3
	入口后让人感到不适,难以继续食用	1
多汁性	鲜嫩多汁,汁水在口腔中迅速扩散	6~7
	较为多汁,咀嚼时有一定的汁水流出	4~5
	有一定的汁水,但不足以改善肉质的干燥程度	2~3
	肉质较干,几乎没有汁水,咬下去感觉硬且柴	1
嫩度	肉质嫩弹,咀嚼感好	6~7
	肉质软硬适中,有嚼劲	4~5
	肉质较硬或软烂,稍有嚼劲	2~3
	肉质干硬或过于软烂,无嚼劲	1
综合评分	整体品质卓越,感官体验极佳	6~7
	整体品质良好,无明显缺陷	4~5
	整体品质一般,存在可改进问题	2~3
	整体品质较差,存在明显缺陷	1

1.3 数据处理

本实验采用三次重复实验设计,实验结果以均值±标准偏差表示。实验数据使用 Statistix 8.1 统计分析软件中的Linear Models 模块进行数据处理,其中 Tukey HSD方法用于判定显著性差异(P<0.05)。数据可视化通过 Origin 2021 软件完成。

2 结果与分析

2.1 低温慢煮时间对即食鸡肝蒸煮损失的影响

蒸煮损失是衡量样品基本性质的重要因素之一,也是衡量其保水性的重要因素。由图 1 可知,与对照组(34.83%)相比,SV 组的蒸煮损失显著降低(P<0.05)。与此同时,随着蒸煮时间由 40 min 增加到 60 min,SV 组的蒸煮损失由 23.89% 增加至 31.95%(P<0.05)。这可能是由于对照组过高的加热温度使样品出现了因蛋白质受热收缩,原本具有持水作用的空间结构和亲水基团发生变化,出现的疏松孔洞从而导致水分流失[20]。与此同时,样品在过度受热过程中,由于毛细血管作用保留的部分水分在加热过程中流出,导致蒸煮损失增大[21]。与之相比,低温慢煮处理可以通过降低煮制温度并延长煮制时间,以尽可能减少蛋白质、脂肪等成分的分解[22],从而减少样品的热敏蛋白受热变性达到降低了样品的蒸煮损失的目的。SV 组加热初期由于样品中心温度较低,因此样品热敏蛋白受热变性不剧烈。周亚军等[23] 在研究不同熟制方式对酱卤猪蹄品质的影响中也发现相较于普通煮制的蒸煮损失率,低温慢煮组的蒸煮损失下降了 1.77%,与本实验趋势一致。

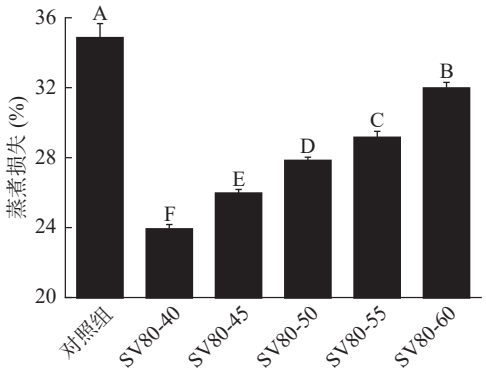


图 1 低温慢煮时间对即食鸡肝蒸煮损失的影响

Fig.1 Effect of different sous-vide time on cooking loss of ready-to-eat chicken liver

注:不同大写字母表示样品间差异显著(P<0.05),图 2~图 4 同。

2.2 低温慢煮时间对色泽的影响

色泽对于消费者是很重要的选择因素之一,是代表样品外观品质的重要指标[24]。由图 2 可知,SV 组的 L^*值由 56.51 下降至 51.12,但与对照组(46.89)相比,SV 处理组的 L^*值整体高于对照组(P<0.05)。有

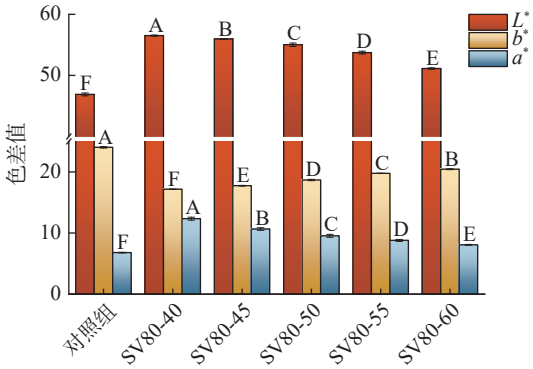


图 2 低温慢煮时间对即食鸡肝色差的影响

Fig.2 Effect of different sous-vide time on color difference of ready-to-eat chicken liver

研究表明，热加工过程中 L^*值的变化与其自身内部水分迁移有关[25]。由于 SV 组样品相对于对照组水分含量提升，高水分环境促使光线更多地向样品内部渗透并引起光的散射，从而提高了 SV 组的 L^*值。而随着 SV 时间的延长样品内部积温升高，结缔组织蛋白逐渐收缩凝聚降低了光线散射，使得 SV 组的 L^*值逐渐下降(P<0.05)。

肉制品的颜色主要由包括肌红蛋白、血红蛋白在内的色素蛋白所影响，在加热过程中样品血红蛋白中的 Fe^{2+}被氧化成 Fe^{3+}，导致红色的氧合肌红蛋白转变成褐色的高铁肌红蛋白[26]，从而影响产品颜色。由图 2 可知，SV 组内的 a^*值随着时间的延长由 12.34 下降至 8.05，且与对照组(6.78)相比，SV 处理组整体高于对照组(P<0.05)。有研究表明 a^*值与血红蛋白变性程度成反比[27]，加热过程导致了血红蛋白的变性增加，高铁肌红蛋白含量增加导致 a^*值降低。与本实验趋势相同。此外对照组的 a^*值低于 SV 组整体，也可以通过热处理过程中对照组温度升高更剧烈，高铁肌红蛋白含量增加来解释。

由图 2 可知，SV 组内的 b^*值随着时间的延长由 17.16 上升至 20.44，且与对照组(24.02)相比，SV 处理组整体低于对照组(P<0.05)。这可能是由于随着加热时间的延长样品中的氧合血红蛋白逐渐变性形成的棕色增加使样品 b^*值上升，而对照组由于热加工温度过高促使更多的氧合血红蛋白发生变性，从而导致 b^*值高于 SV 组[28]。对此 Zhang 等[29] 在低温慢煮对鸭肉的研究中发现更高温度下鸭肉的 b^*值有升高的趋势，与本实验结果类似。

2.3　低温慢煮时间对水分含量、水分活度和 pH 的影响

水分含量是评价产品品质特性的一个重要的基础指标，侧面反映了样品在热处理中的保水能力，对其品质有重大意义。由表 2 可知，SV 组的水分含量随着处理时间的延长逐渐下降(P<0.05)，但整体要高于对照组(65.91%)。这可能是因为对照组处理温度过高，导致结缔组织收缩程度增加，系水力下降[30]。而 SV 组采用了更低的处理温度，避免了内部细胞因过高的处理温度而破裂从而防止水分散失。与此同时，随着 SV 时间的延长，SV 组内水分含量由 73.04% 下降至 69.38%。这是由于长时间的煮制导致样品系水力下降，从而使得水分含量降低。

表 2　低温慢煮时间对即食鸡肝水分含量、水分活度和 pH 的影响

Table 2　Effects of sous-vide time on water content, water activity and pH of ready-to-eat chicken liver

处理组	水分含量(%)	水分活度	pH
对照组	65.91±0.13^{F}	0.9685±0.001^{E}	6.66±0.06^{A}
SV80-40	73.04±0.13^{A}	0.9827±0.002^{A}	6.37±0.01^{D}
SV80-45	71.58±0.35^{B}	0.9812±0.001^{B}	6.41±0.01^{D}
SV80-50	71.14±0.46^{C}	0.9806±0.001^{BC}	6.55±0.01^{C}
SV80-55	70.46±0.11^{D}	0.9799±0.002^{C}	6.56±0.02^{C}
SV80-60	69.38±0.14^{E}	0.9778±0.003^{D}	6.60±0.10^{B}

注：同列不同大写字母表示数据差异显著(P<0.05)，表3~表4同。

水分活度是反映样品内部稳定性以及影响微生物活动的重要指标，适当降低水分活度有利于产品保持品质，利于后期贮藏[31]。由表 2 可知，SV 组的水分活度显著高于对照组，且随着处理时间的增加，SV 组内的水分活度由 0.9827 下降至 0.9778，总体呈现下降趋势(P<0.05)。这可能是因为对照组经过高温处理使内部细胞结构破裂水分含量下降。同时有研究表明水分活度过低则会影响产品品质[32]。因此提高 SV 处理时间能够适当降低产品的水分活度，提高产品稳定性。

在加热处理过程中，肉制品的 pH 会因为汁液流失，蛋白质变性，脂质氧化等因素而出现波动[33]。由表 2 可知，SV 组样品的 pH 随着处理时间的增加呈逐渐升高的趋势，即由 6.37 上升至 6.60(P<0.05)，且在 SV 处理 60 min 时达到最高值，但整体均低于对照组(6.66)。这可能是因为对照组的温度过高，使得样品内部蛋白质过度水解，蛋白质发生变性使得酸性基团被破坏，从而导致 pH 上升[33]。而 SV 组的处理温度较低，胶原蛋白在 80 ℃ 以下变性缓慢，蛋白质未能完全解离变性聚集程度较低，未解离出过多碱性基团，所以 pH 偏高。Sujiwo 等[34] 研究 SV 处理可能会使里脊肉产生肽键分离，并且涉及巯基、咪唑和羟基的键断裂并生成碱性化合物等作用从而导致 pH 升高，与本实验一致。

2.4　低温慢煮时间对剪切力的影响

剪切力是反映样品嫩度的重要指标，也是影响消费者感官评价的重要一环[35]。肉制品嫩度受其内部结缔组织，蛋白变形程度，水分含量以及化学组成影响，并最终由剪切力表征。由图 3 可知，与对照组(2.48 N)相比，SV 组的剪切力显著降低(P<0.05)。对照组由于采用过高的温度进行热处理使其内部水分大量散失，从而降低了其嫩度。Hughes 等[36] 发现肉制品的嫩度与其水分含量可能呈现正相关关系，这与之前的水分含量的结果相符合。由此可见，SV 组相较于对照改善了过于干硬的情况，提升了产品嫩

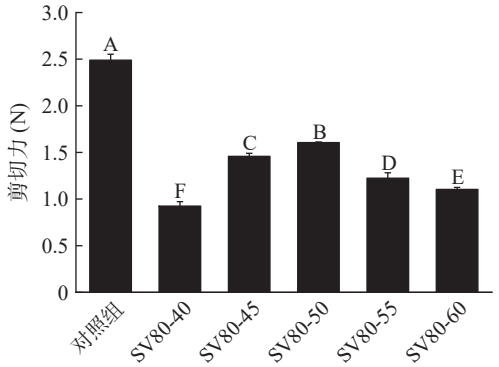


图 3　低温慢煮时间对即食鸡肝剪切力的影响

Fig.3　Effect of sous-vide time on shear force of ready-to-eat chicken liver

度。同时，随着时间的延长，SV 组样品的剪切力呈现先增加后下降的趋势（P<0.05），SV80-50 组剪切力达到最高值（1.60 N），相较于 SV80-40 组提高了 73.9%，较 SV80-60 组提高了 45.05%。这可能是由于热处理促进结缔组织和肌浆蛋白发生凝聚收缩，使得 SV 组在 40~50 min 阶段剪切力升高；之后随着热处理时间的延长，样品中结缔组织中的胶原蛋白逐渐转变为凝胶状态质地变软，因而剪切强度也会随之降低[37]。

2.5 低温慢煮时间对质构的影响

质构特性可以反映样品的硬度、咀嚼性、弹性和内聚性，是肉制品品质分析中非常重要的指标之一。由表 3 可知，与对照组相比，SV 处理整体硬度和咀嚼性低于对照组（P<0.05）。随着蒸煮时间的延长，即食鸡肝的硬度、咀嚼性、弹性和内聚性呈现先增加后降低的趋势，且在蒸煮时间为 50 min 时，具有最高的硬度（1850.95 g）、咀嚼性（531.70 g.s）和弹性（76.86%）（P<0.05）。有研究表明，蛋白质变性会因受到更高温度的热诱导而加剧并最终影响产品硬度[38]。对照组由于采用了更高的温度处理，蛋白质之间形成新的作用力导致蛋白质的聚集[39]，从而导致肉质较干硬。而 SV 组采用相对较低温度且长时间加热方式，结缔组织收缩程度与蛋白质变性程度相对较低，可有效降低样品硬度。邓丽等[40] 研究发现当温度相对较低时，低温慢煮氢键和疏水键暴露，会促使加热过程中形成柔软的凝胶从而增加样品嫩度，与本实验现象类似。另外，随着蒸煮时间的延长，SV 组样品的硬度、咀嚼性、弹性和内聚性呈现先上升的趋势，在 50 min 时升至组内最高。而当时间继续延长，硬度、咀嚼性、弹性和内聚性呈下降趋势（P<0.05）。这可能是因为在加热初始阶段，SV 组内部结构积温升高导致结缔组织收缩，胶原蛋白受热形成凝胶，从而使得硬度、咀嚼性、弹性等升高。而随着时间继续延长，SV 组内蛋白质结构受到破坏导致样品失水严重变得软烂，使得样品硬度、咀嚼性和弹性下降，对此彭子宁等[41] 研究 SV 处理牛肉品质特性的影响发现了类似的规律，与本实验一致。

表 3 低温慢煮时间对即食鸡肝质构特性的影响

Table 3 Effect of sous-vide time on the texture characteristics of ready-to-eat chicken liver

处理组	硬度(g)	咀嚼性(g·s)	弹性(%)	内聚性(g·s)
对照组	2214.82±15.56^{A}	703.02±11.88^{A}	67.98±1.72^{C}	0.09±0.001^{D}
SV80-40	1529.80±18.80^{E}	355.26±20.50^{D}	55.53±0.13^{E}	0.08±0.003^{E}
SV80-45	1636.48±35.89^{D}	451.25±16.95^{C}	62.87±0.47^{D}	0.09±0.004^{D}
SV80-50	1850.95±31.28^{B}	531.70±14.36^{B}	76.86±0.70^{A}	0.10±0.004^{C}
SV80-55	1718.54±28.32^{C}	523.99±18.11^{B}	74.86±0.51^{B}	0.12±0.002^{A}
SV80-60	1654.59±24.62^{D}	461.84±11.18^{C}	68.84±0.99^{C}	0.11±0.001^{B}

2.6 低温慢煮时间对电子鼻的影响

不同处理时间对样品电子鼻的影响如图 4 所示。由图 4（A）可知，随着时间的延长，传感器 W1S，W2S、W6S、W1W，W5S 的响应值较高，这表明样品中含有较多的短链烷烃，醇类、醛类、酮类、氢化物以及氮氧化合物。与对照组相比，SV 组的 W6S，W2W、W5C 的响应值较高，说明高温使得样品减少了氢化物，芳香族化合物以及烯烃的含量。且相对于高温处理，SV 处理使得样品的风味轮廓发生了改变，产生了较多的风味物质。其中随着时间的延长 SV 处理组中 W2S 响应值逐渐降低，这可能因为热处理时间的延长使样品中脂肪裂解为其他化合物。

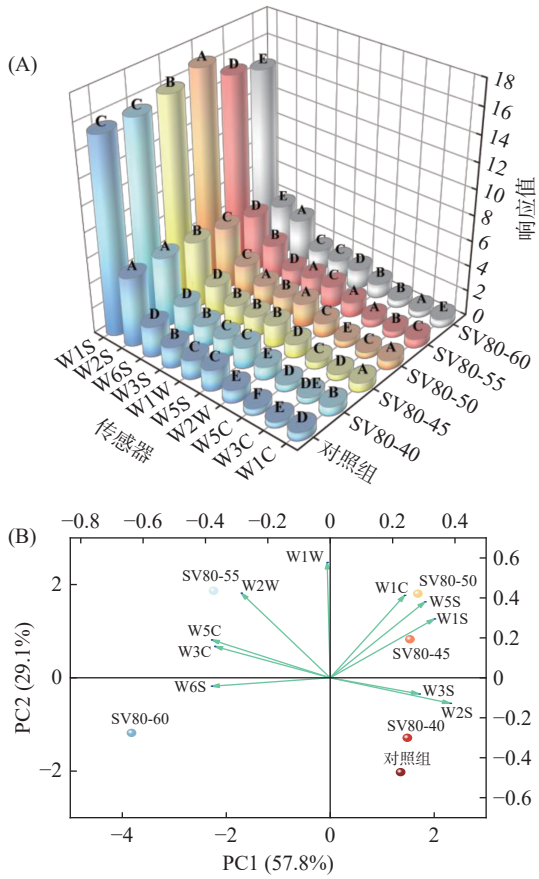


图 4 不同低温慢煮时间对鸡肝电子鼻响应值（A）和主成分分析（B）

Fig.4 Response values (A) and principal component analysis (B) of e-nose of chicken livers with different sous-vide time

如图 4（B）所示，第 1 主成分（PC1）和第 2 主成分（PC2）的方差贡献率分别为 57.8% 和 29.1%，累计方差贡献率为 86.9%，共可解释原始变量 86.9% 的信息，这表明其可以较好地表征样品的挥发性气味。其中 40、45、50 min 和对照组在 PC1 的正半轴，且 45 min 和 50 min 在第一象限，这表明它们之间整体风味变化不大；而 55 min 和 60 min 在 PC1 的负半轴，并且在不同象限，并且各组之间能很好地区别开来，这表明各组之间差别显著，较好地区分了各组之间的风味变化。其中 55 min 和对照组在不同象限，证明气味区别明显。

2.7 低温慢煮时间对微观结构的影响

不同低温慢煮时间对样品微观结构的影响如

图 5 所示。由图 5 可知，对照组和 SV 组的微观结构差异较为明显。对照组出现了较为明显的大孔洞，呈现出疏松多孔、不规则且不平整状态的网状结构。这种结构不能有效保留水分和脂质成分从而造成严重的水分流失，这也证明了对照组在蒸煮损失，咀嚼性和内聚性与 SV 组的区别。此外，基于剪切力与质构特性数据，SV80-50 组、SV80-55 组及 SV80-60 组样品综合表现较优，因此选定该三组与对照组进一步开展微观结构观察与分析。相比于对照组，SV 组由于处理温度较低，因此呈现出较为致密的网络结构并且排列较为整齐平滑，表现出较好的品质特性。这与 Ángel-Rendón 等[42] 研究低温处理对猪肉的微观结构的影响结果相似。但随着加热时间的延长，SV 组也出现了一些不规则的网状结构。这是因为由于处理时间延长使得样品的蛋白质和结缔组织变性程度增加，使样品内部水分损失增大从而出现了较为明显的孔洞，同时样品的剪切力及内聚性等品质特性下降。

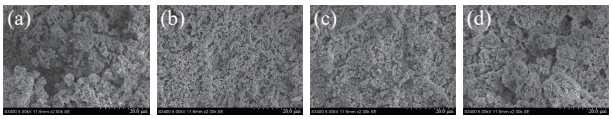


图 5　不同低温慢煮时间处理后鸡肝的扫描电镜图(2000×)

Fig.5　Scanning electron microscope images of chicken liver after different sous-vide time (2000×)

注：(a)~(d)分别为对照组、SV80-50、SV80-55、SV80-60。

2.8　低温慢煮时间对二级结构的影响

通过傅立叶变换红外光谱并利用傅里叶去卷积可定量分析二级结构[43]，从而观察不同处理时间对样品二级结构的影响。由图 6(A)所示，位于 1600~1700 cm^{-1} 被称为酰胺 I 带，因其灵敏度高常与蛋白质二级结构变化有关[9]，其中 1600~1640 cm^{-1} 的峰为 β-折叠，1640~1650 cm^{-1} 的峰为无规则卷曲，1650~1660 cm^{-1} 的峰为 α-螺旋，1660~1700 cm^{-1} 的峰为 β-转角。图 6(A)显示不同处理组之间在 1600~1700 cm^{-1} 呈现出相似的模式，这表明没有引起不同组样品之间官能团的明显变化。而蛋白质的二级结构含量以 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲结构含量以及之间的相互转化表示[44]。由图 6(B)可知，与对照组(22.01%)相比，SV 组的 α-螺旋和无规则卷曲含量显著降低，β-折叠和 β-转角含量显著增加(P<0.05)。另外随着蒸煮时间的延长，SV 组内的 α-螺旋含量由 17.58% 上升至 20.34%，β-折叠含量由 48.45% 下降至 46.82%，β-转角含量由 26.57% 下降至 21.40%，无规则卷曲含量由 9.34% 上升至 13.43%(P<0.05)。刘芙蓉等[45] 在热诱导蛋白质变性的研究中观察到类似现象即温度升高会导致 α-螺旋和 β-转角比例降低。这可能是由于对照组的热处理温度过高，蛋白质发生变性，伴随着羰基和氨基之间氢键的断裂形成无序聚集态，使得对照组蛋白质中 α-螺旋含量升高，进而表现出其较高的 α-螺旋含量[46]。因此 SV 处理可有效诱导蛋白质二级结构发生构象转变，具体表现为 α-螺旋向 β-折叠的转化趋势。同时随着 SV 组处理时间的延长，无规则卷曲含量逐渐回升，而 β-折叠比例相应减少(P<0.05)，这可能与 SV 组样品随处理时间延长，蛋白质严重氧化导致二级结构的降解有关。Liu 等[47] 研究表明 β-折叠含量与蛋白质凝胶性能呈正相关，进而影响样品的质构特性和嫩度。对此 Cao 等[9] 研究表明通过 α-螺旋向 β-折叠的转化可在热处理的催化下有效促使形成更加稳定的三维网状结构。综合上述表明，SV 处理通过调控蛋白质二级结构的构象转化，可有效改善产品的嫩度与质构特性。

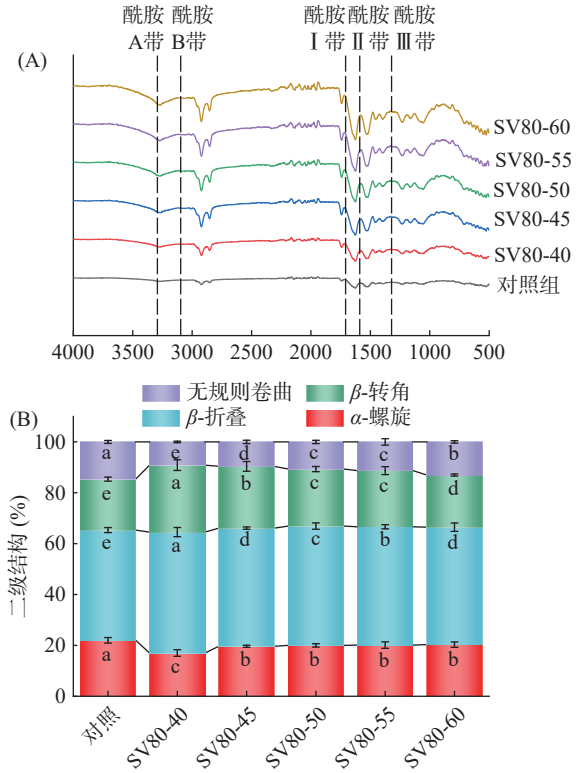


图 6　不同低温慢煮时间对鸡肝的傅里叶光谱图(A)和蛋白质二级结构(B)

Fig.6　FTIR spectrum (A) and secondary structure (B) of chicken livers with different sous-vide time

注：不同小写字母表示数据差异显著(P<0.05)。

2.9　低温慢煮时间对感官评价的影响

由表 4 可知，与对照组相比(4.30)，SV 组的色泽评分显著增加，且随着蒸煮时间的延长，SV 组内色泽评分由 4.63 提升至 6.16，随后下降至 5.60，蒸煮时间为 55 min 时，具有最高的色泽评分(P<0.05)。此外，SV 组内形态、气味、滋味、多汁性、嫩度、综合评分也呈现出相同的趋势(P<0.05)。对照组因高温导致水分流失折射率降低，从而使得对照组亮度下降，此现象与低温慢煮色泽变化规律一致。同时，高温引发的蒸煮异味影响对照组气味[4]，使得 SV 组气味得分显著高于对照组。而 SV 组因处理温度降低，有效抑制结缔组织剧烈收缩及蛋白质过度变性，使其

表 4 低温慢煮时间对即食鸡肝感官评价的影响

Table 4 Effect of different Sous-vide time on sensory evaluation of chicken liver

处理组	色泽	形态	气味	滋味	多汁性	嫩度	综合评分
对照组	4.30 ± 0.10^{E}	3.70 ± 0.20^{E}	4.63 ± 0.15^{D}	3.93 ± 0.28^{E}	3.80 ± 0.30^{D}	3.60 ± 0.10^{F}	3.70 ± 0.20^{E}
SV80-40	4.63 ± 0.05^{D}	4.56 ± 0.06^{D}	4.76 ± 0.12^{D}	4.26 ± 0.06^{D}	6.26 ± 0.12^{A}	4.63 ± 0.06^{E}	4.93 ± 0.06^{D}
SV80-45	5.06 ± 0.11^{C}	5.05 ± 0.12^{C}	5.20 ± 0.10^{C}	5.33 ± 0.15^{C}	6.06 ± 0.11^{A}	5.30 ± 0.10^{D}	5.30 ± 0.10^{C}
SV80-50	5.50 ± 0.10^{B}	5.46 ± 0.05^{B}	5.40 ± 0.11^{BC}	6.06 ± 0.16^{A}	5.70 ± 0.10^{B}	5.53 ± 0.10^{C}	5.59 ± 0.15^{B}
SV80-55	6.16 ± 0.05^{A}	6.06 ± 0.11^{A}	6.03 ± 0.12^{A}	5.76 ± 0.06^{B}	5.53 ± 0.06^{B}	6.16 ± 0.05^{A}	6.10 ± 0.10^{A}
SV80-60	5.60 ± 0.12^{B}	5.60 ± 0.10^{B}	5.53 ± 0.06^{B}	5.36 ± 0.08^{C}	4.83 ± 0.05^{C}	5.66 ± 0.06^{B}	5.63 ± 0.07^{B}

状态与嫩度评分显著优于对照组。因此,综合分析感官评价结果可知,SV80-55 组综合评价最佳,可确认为最佳工艺参数。

3 结论

低温慢煮技术可以有效改善即食鸡肝因高温处理导致的硬度增加、水分含量下降、口感和风味严重劣化等问题。其中在 SV 处理时间为 55 min 时,样品嫩度与内聚性有最大幅度提升。同时,蛋白质二级结构结果表明 SV 处理 55 min 可以促进样品中 α-螺旋向 β-折叠转化,形成更加稳定的三维网状结构;扫描电镜结果表明 SV 处理 55 min 下样品具有更加结构有序,排列整齐的微观结构。此外感官评价结果表明,SV 处理时间为 55 min 时样品色泽、形态、气味、嫩度得分最高,并且具有最高的综合评分。综上所述,利用 SV 处理下的最佳时间为 55 min,此时样品的品质达到最佳,最符合消费者需求。然而低温肉制品较常规高温高压肉制品而言,在货架期以及贮藏方式方面多有不足,而如何结合天然防腐剂与新型消毒杀菌技术延长货架期也仍是技术突破重点。因此今后主要针对低温制品货架期延长方面进行着重研究。

© The Author(s) 2026. 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] QU Z, SHAH D H, SABLANI S S, et al. Thermal inactivation kinetics of *Salmonella* and *Campylobacter* in chicken livers[J]. Poultry Science, 2024, 103(8): 103961.

[2] TOLDRÁ-REIG F, MORA L, TOLDRÁ F. Trends in biodiesel production from animal fat waste[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3644.

[3] CHEN Jiawen, HU Yadong, GAO Pei, et al. Effect of κ-carrageenan on the physicochemical and structural characteristics of ready-to-eat Antarctic Krill surimi gel[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(6): 3711−3722.

[4] 石泽雨, 孙志刚, 曹传爱, 等. 关键工艺点对四喜丸子软罐头高温蒸煮异味形成的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 62−72. [SHI Zeyu, SUN Zhigang, CAO Chuanai, et al. Effects of key process points on the formation of volatile components in soft canned braised pork balls in gravy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 62−72.]

[5] 刘欣睿, 王美娟, 计云龙, 等. 低温慢煮时间对即食鸡胸肉品质及消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 114−122. [LIU Xinrui, WANG Meijuan, JI Yunlong, et al. Effect of sous-vide time on the quality profiles and *in vitro* digestibility of ready-to-eat chicken breast[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 114−122.]

[6] 周寅涛, 冯绍彪, 水珊珊, 等. 真空低温慢煮加工对中华管鞭虾肌肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 108−118. [ZHOU Yintao, FENG Shaobiao, SHUI Shanshan, et al. Effect of vacuum low temperature slow cooking on muscle quality of *Penaeus chinensis*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 108−118.]

[7] ZAVADLAV S, BLAŽIĆ M, VAN D V F, et al. Sous-vide as a technique for preparing healthy and high-quality vegetable and seafood products[J]. Foods, 2020, 9(11): 1537.

[8] SINGH C B, KUMARI N, SENAPATI S R, et al. Sous vide processed ready-to-cook seerfish steaks: Process optimization by response surface methodology and its quality evaluation[J]. LWT, 2016, 74: 62−69.

[9] CAO Chuanai, FENG Yangyang, KONG Baohua, et al. Textural and gel properties of frankfurters as influenced by various κ-carrageenan incorporation methods[J]. Meat Science, 2021, 176: 108483.

[10] KONG B H, XIONG Y L, FANG C D, et al. Influence of gender and spawning on meat quality of Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) stored at 2 ℃[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(6): E320−E325.

[11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard determination of moisture in food: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[12] 李龙祥, 赵欣欣, 夏秀芳, 等. 食盐对调理重组牛肉制品品质及水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 143−148. [LI Longxiang, ZHAO Xinxin, XIA Xiufang, et al. Effect of salt on quality and water distribution characteristics of ready-to-eat restructured beef products[J]. Food Science, 2017, 38(19): 143−148.]

[13] YUAN Dongxue, XU Yining, KONG Baohua, et al. Application of seaweed dietary fiber as a potential alternative to phosphates in frankfurters with healthier profiles[J]. Meat Science, 2023, 196: 109044.

[14] HOU Xu, LIANG Rongrong, MAO Yanwei, et al. Effect of suspension method and aging time on meat quality of Chinese fattened cattle *M. Longissimus dorsi*[J]. Meat Science, 2014, 96(1): 640−645.

[15] KIM H W, HWANG K E, SONG D H, et al. Effect of glasswort (*Salicornia herbacea* L.) on the texture of frankfurters[J].

Meat Science, 2014, 97(4): 513−517.
[16] 赵宏蕾, 辛莹, 刘美月, 等. 柠檬酸钠协同碳酸氢钠替代磷酸盐对法兰克福香肠品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 94−103. [ZHAO Honglei, XIN Ying, LIU Meiyue, et al. Effect of sodium citrate combined with sodium hydrogen carbonate on the quality of phosphate-free frankfurters[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 94−103.]
[17] MAQSOOD S, BENJAKUL S, BALANGE A K. Effect of tannic acid and kiam wood extract on lipid oxidation and textural properties of fish emulsion sausages during refrigerated storage[J]. Food Chemistry, 2012, 130(2): 408−416.
[18] SUN Weizheng, ZHOU Feibai, ZHAO Mouming, et al. Physicochemical changes of myofibrillar proteins during processing of Cantonese sausage in relation to their aggregation behaviour and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 472−478.
[19] CHEN Yichun, JIA Xiwen, SUN Fangda, et al. Using a stable pre-emulsified canola oil system that includes porcine plasma protein hydrolysates and oxidized tannic acid to partially replace pork fat in frankfurters[J]. Meat Science, 2020, 160: 107968.
[20] SÁNCHEZ D P J, GÁZQUEZ A, RUIZ-CARRASCAL J. Physico-chemical, textural and structural characteristics of sous-vide cooked pork cheeks as affected by vacuum, cooking temperature, and cooking time[J]. Meat Science, 2012, 90(3): 828−835.
[21] CHAMPION A E, PURSLOW P P, DUANCE V C. Dimensional changes of isolated endomysia on heating[J]. Meat Science, 1988, 24(4): 261−273.
[22] 刘欣睿, 孔保华, 夏秀芳, 等. 低温慢煮对肉制品食用品质及货架期影响的研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(12): 49−56. [LIU Xinrui, KONG Baohua, XIA Xiufang, et al. Progress in research on the effect of sous-vide on the eating quality and shelf-life of meat products[J]. Meat Research, 2022, 36(12): 49−56.]
[23] 周亚军, 李彬, 马清书, 等. 熟制方式对酱卤猪蹄食用品质及风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 15−22. [ZHOU Yajun, LI Bin, MA Qingshu, et al. Effects of cooking methods on the edible quality and flavor substances of sauced pig's trotters[J]. Food Science, 2022, 43(13): 15−22.]
[24] 吴九夷, 姚文晶, 曹传爱, 等. 海藻膳食纤维对低脂低盐鸡肉法兰克福香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 87−93. [WU Jiuyi, YAO Wenjing, CAO Chuanai, et al. Effect of seaweed dietary fiber on quality of low-fat and low-salt chicken frankfurters[J]. Food Science, 2023, 44(2): 87−93.]
[25] 徐言, 陈季旺, 莫加利, 等. 烤制温度和时间对烧烤草鱼块品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 36−43. [XU Yan, CHEN Jiwang, MO Jiali, et al. Effect of baking temperature and time on the quality of grilled grass carp pieces[J]. Food Science, 2022, 43(15): 36−43.]
[26] 刘威, 魏先领, 张远红, 等. 不同烹饪方法对鸽胸肉品质的影响[J]. 美食研究, 2025, 42(1): 57−62. [LIU Wei, WEI Xianling, ZHANG Yuanhong, et al. Effect of different cooking methods on the quality of pigeon breast[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2025, 42(1): 57−62.]
[27] VAUDAGNA S R, PAZOS A A, GUIDI S M, et al. Effect of salt addition on *sous vide* cooked whole beef muscles from Argentina[J]. Meat Science, 2008, 79(3): 470−482.
[28] NOH S W, SONG D H, HAM Y K, et al. Physicochemical properties of chicken breast and thigh as affected by sous-vide cooking conditions[J]. Foods, 2023, 12(13): 2592.
[29] ZHANG Man, CHEN Mengfei, FANG Fan, et al. Effect of sous vide cooking treatment on the quality, structural properties and flavor profile of duck meat[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 29: 100565.
[30] 廖添洪, 张辰晏, 吉宏武, 等. 真空低温蒸煮技术对凤尾虾品质与风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 310−320. [LIAO Tianhong, ZHANG Chenyan, JI Hongwu, et al. Effect of sous vide technology on quality and volatile compounds in peeled deveined tail-on shrimp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 310−320.]
[31] 房晓宇, 薛祎珂, 熊善柏, 等. 水分活度降低剂对半干武昌鱼品质的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(8): 48−55. [FANG Xiaoyu, XUE Yike, XIONG Shanbai, et al. Effect of water activity-lowering agents on the quality of semi-dried blunt snout bream[J]. Meat Research, 2024, 38(8): 48−55.]
[32] 宋淑文, 杨天志, 董亚云, 等. 传统干腌猪肉制品加工过程中理化性质及挥发性风味变化[J]. 肉类研究, 2024, 38(6): 51−59. [SONG Shuwen, YANG Tianzhi, DONG Yayun, et al. Changes in physicochemical properties and volatile flavor components of traditional dry-cured pork during processing[J]. Meat Research, 2024, 38(6): 51−59.]
[33] 唐建华, 张秀南, 何小龙, 等. 加热温度对草鱼肉理化性质、质构与微观结构的影响[J]. 美食研究, 2020, 37(4): 62−67. [TANG Jianhua, ZHANG Xiunan, HE Xiaolong, et al. Effects of heating temperature on the physical and chemical properties, texture profiles and microstructure of grass carp[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2020, 37(4): 62−67.]
[34] SUJIWO J, LEE S, KIM D, et al. Physicochemical features and volatile organic compounds of horse loin subjected to sous-vide cooking[J]. Foods, 2024, 13(2): 280.
[35] 于秋影, 曹传爱, 梁雪, 等. 呼吸式滚揉工作时间对调理牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 28−35. [YU Qiuying, CAO Chuanai, LIANG Xue, et al. Effect of duration time of breathing tumbling on the quality profiles of prepared beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 28−35.]
[36] HUGHES J M, OISETH S K, PURSLOW P P, et al. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness[J]. Meat Science, 2014, 98(3): 520−532.
[37] ISMAIL I, HWANG Y H, BAKHSH A, et al. Control of sous-vide physicochemical, sensory, and microbial properties through the manipulation of cooking temperatures and times[J]. Meat Science, 2022, 188: 108787.
[38] DING Yuqin, LIU Ru, RONG Jianhua, et al. Heat-induced denaturation and aggregation of actomyosin and myosin from yellowcheek carp during setting[J]. Food Chemistry, 2014, 149: 237−243.
[39] 孔保华, 耿欣, 郑冬梅. 加热对鲢鱼糜凝胶特性及二硫键的影响[J]. 食品工业科技, 2004, 25(6): 71−73. [KONG Baohua, GENG Xin, ZHENG Dongmei. Effect of heating on the gel properties and disulfide bonds of silver carp surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2004, 25(6): 71−73.]
[40] 邓丽, 李岩, 董秀萍, 等. 热加工过程中鲍鱼腹足蛋白间作用力及其质构特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 307−316. [DENG Li, LI Yan, DONG Xiuping, et al. Chemical interactions and textural characteristics of abalone pleopod muscle protein during heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 307−316.]
[41] 彭子宁, 刘树萍, 郑昌江. 真空低温烹煮酱牛肉的工艺优化[J]. 美食研究, 2020, 37(2): 48−52. [PENG Zining, LIU Shuping, ZHENG Changjiang. Optimization of sauced beef sous vide cooked

at low temperature[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2020, 37(2): 48−52.]

[42] ÁNGEL-RENDÓN S V, FILOMENA-AMBROSIO A, HERNÁNDEZ-CARRIÓN M, et al. Pork meat prepared by different cooking methods. A microstructural, sensorial and physicochemical approach[J]. Meat Science, 2020, 163: 108089.

[43] BIAN Chuhan, YU Huijie, YANG Kun, et al. Effects of single-, dual-, and multi-frequency ultrasound-assisted freezing on the muscle quality and myofibrillar protein structure in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100362.

[44] ZHANG Chao, LI Xiangao, WANG Hao, et al. Ultrasound-assisted immersion freezing reduces the structure and gel property deterioration of myofibrillar protein from chicken breast[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105137.

[45] 刘芙蓉, 王雨生, 李鹏, 等. 热诱导温度与 pH 值对乳清浓缩蛋白凝胶结构和性质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 125−134. [LIU Furong, WANG Yusheng, LI Peng, et al. Effect of heating temperature and pH on the structure and properties of whey protein concentrate gels[J]. Food Science, 2022, 43(20): 125−134.]

[46] 李甜甜, 谭青玲, 卢家维, 等. 真空低温烹饪温度对肌原纤维蛋白凝胶特性和结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(18): 240−246. [LI Tiantian, TAN Qingling, LU Jiawei, et al. Effects of sous-vide cooking temperature on gelling properties and structure of myofibrillar protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(18): 240−246.]

[47] LIU Ru, ZHAO Siming, XIE Bijun, et al. Contribution of protein conformation and intermolecular bonds to fish and pork gelation properties[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 898−906.