

不同冷却方式对冷鲜鸡肉品质的影响

陈超杰, 王曜, 徐如颖, 刘宝林

(上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 探究不同冷却方式对鸡肉水分分布、蛋白质变性等理化性质的影响。**方法** 分析风冷、真空冷却和浸没式真空冷却对鸡肉的冷却速率、pH、色差、质构等指标的影响, 通过低场核磁共振和差式扫描量热技术分析冷却后鸡肉中水分分布和肌蛋白的变化。**结果** 风冷的冷却速率最慢, 肉色暗沉, 且质量损失率高, 硬度和剪切力也较大; 真空冷却的冷却速率最快, 肉色较为鲜艳, 其质量损失率、硬度和剪切力也最大; 浸没式真空冷却能有效减小鸡肉的质量损失率 ($P<0.05$), 肉色最鲜艳, 弹性和回复性也最好。通过差式扫描量热法分析可知, 3种冷却方式下肌蛋白的变性焓均减小, 风冷组的肌球蛋白、肌浆蛋白和肌动蛋白降解最多, 真空冷却组的蛋白降解较风冷组更好, 浸没式真空冷却组的蛋白降解最小, 与对照组无显著差异; 由低场核磁共振分析可知, 风冷组不易流动水组分显著降低 ($P<0.05$), 自由水显著增加 ($P<0.05$), 真空冷却自由水组分显著降低 ($P<0.05$), 浸没式真空冷却后鸡肉中水分分布与对照组无显著差异。**结论** 浸没式真空冷却弥补了真空冷却不足, 在一定程度上提高了鸡肉品质。

关键词: 冷却方式; 浸没式真空冷却; 品质; 差式扫描量热仪; 低场核磁共振

中图分类号: TS251.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)11-0026-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.11.004

Effects of Different Cooling Methods on the Qualities of Chicken Meat

CHEN Chao-jie, WANG Yao, XU Ru-ying, LIU Bao-lin

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: To explore the effects of different cooling methods on air cooling (AC), vacuum cooling (VC) and immersion vacuum cooling (IVC) on the quality on chicken meat. By analyzing the effects of three cooling methods on chicken's cooling rate, pH, color, and texture. Low-field nuclear magnetic resonance (LW-NMR) and differential scanning calorimetry (DSC) techniques were used to analyze the moisture distribution and muscle in the chicken after cooling. Compared with air cooling, the cooling rate of VC and IVC was significantly increased; IVC can effectively reduce the weight loss rate of meat ($P<0.05$); after VC and IVC, the pH of the meat was significant higher than that of air-cooled cooling; the texture results showed that the hardness of the meat pieces increased significantly after VC and air cooling ($P<0.05$); The analysis by DSC showed that the denaturation enthalpy of muscle protein was reduced under the three cooling methods, and the myofibrin and sarcoplasmic protein were significantly denatured after air cooling ($P<0.05$); the low-field NMR analysis showed that the vacuum there was no significant difference in the water distribution of chicken meat after VC and

收稿日期: 2021-03-30

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2017YFD0400404)

作者简介: 陈超杰 (1995—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻低温生物医学。

通信作者: 刘宝林 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为低温生物医学技术和食品冷冻冷藏。

IVC, while the components of non-flowing water in the air cooling group were significantly reduced ($P<0.05$), and free water was significantly increased ($P<0.05$). IVC makes up for the lack of vacuum cooling, improves chicken quality to a certain extent, reduces weight loss and improves water retention.

KEY WORDS: cooling method; immersion vacuum cooling; quality; differential scanning calorimeter; low field nuclear magnetic resonance

当前,消费者对禽肉冷鲜产品的品质要求越来越高^[1]。宰后处理的方式和条件对禽肉冷鲜产品的品质有较大影响。温度是影响食品质量和安全的重要参数,胴体在解僵成熟过程中,肌肉组织会发生多种复杂的生化反应,环境温度将直接影响各类反应速度^[2]。宰后胴体预冷方式和冷却速率对冷鲜鸡的品质至关重要。

采用传统的风冷技术(Air Cooling, AC)对肉制品进行冷却时,耗时长且产品的品质较低。真空冷却(Vacuum Cooling, VC)是将样品放置在低压环境中,使其内外自由水气化,通过沸腾传热以实现快速降温的一种冷却方式^[3],其能大大提高冷却后产品的品质,近年来被广泛应用于熟肉制品^[4]和果蔬^[5]等的快速冷却。VC存在的质量损失率高、样品表面硬度增加等不足限制了VC在食品工业的广泛应用^[6]。浸没式真空冷却(Immersion Vacuum Cooling, IVC)将水蒸发、热传导和热对流这3种传热方式整合,相比传统冷却方式,它可实现较高的冷却速率,并有效解决真空冷却后质量损失率高的问题,提高冷却后食品的品质^[7]。近年来,IVC被广泛应用于熟肉制品。程巧芬等^[8]对猪肉火腿的研究发现,经IVC处理的猪肉火腿,其冷却后的质量损失率可降至6.99%,仅为VC的51%。冯朝辉等^[9]研究结果显示,IVC可以延长食品的货架期。

目前,大多数IVC研究集中在水分迁移对食品品质和理化性质的影响^[10],对冷却后蛋白质变性和保水性的研究相对较少。对于冷鲜肉,肌蛋白降解程度和保水性是影响品质的关键指标^[11]。文中采用低场核磁共振仪(Low Field Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR)和差式扫描量热仪(Differential Scanning Calorimeter, DSC)测量鸡肉中水组分的变化,以及蛋白质变性过程中温度和能量的变化,分析不同冷却方法对鸡肉中水分分布和蛋白质变性的影响,探讨不同冷却方式对鸡肉品质的影响。

1 实验

1.1 材料和仪器

主要实验材料:选取商业饲养场(上海圣华副食品有限公司)批次相同的喂养70~90 d的活体三黄鸡6只,质量为1.5~2.0 kg,宰前禁水禁食12 h。将活鸡宰杀后,迅速运至实验室,取其鸡大胸肉,分为对

照组和实验组,对照组是新鲜鸡肉,实验组分别进行AC, VC, IVC处理。AC组直接在企业冷却间进行冷却;VC组的真空泵抽速为2 L/s,终压为600 Pa;IVC组真空系统控制参数与VC组一致,冷却时将肉放在22℃的纯净水中,水刚淹没鸡肉为宜。3种冷却方式均以肉中心温度达到4℃后停止冷却,标号测定不同处理组样品的各项指标。

主要实验仪器:双变频真空预冷机,课题组自制^[12];HH-1恒温水浴锅,俊思电子有限公司;T型热电偶,温度精度为 ± 0.1 ℃,美国OMEGA;TA-XT2i质构仪,英国Stable Micro Systema公司;CR-400色差仪,柯尼卡美能达(中国)投资有限公司;PHS-3C pH计,上海仪电科学仪器股份有限公司;LXJ-B离心机,上海安亭科学仪器厂;差式扫描量热仪DSC200 F3,温度精度为0.1℃,德国NETZSCH公司;PQ001核磁共振分析仪,上海纽迈电子有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 降温速率

AC组的温度监测由温湿度记录仪在圣华副食品有限公司测定,冷却间冷风的温度为0~2℃,将笔插式温度计插入鸡胸内部测定冷却终温。VC和IVC组利用真空冷却机所配置的T型热电偶测定,温度精度为 ± 0.1 ℃,探头直径小于3 mm。冷却终温定为4℃,每组取3个样品,结果取其平均值。

1.2.2 质量损失率测定

不同冷却方式下,冷却前后分别标号并称重记录。

$$\text{冷却质量损失率} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为冷却前样品质量; m_1 为样品冷却后质量。

1.2.3 pH值测定

取同一部位10.0 g鸡肉绞碎,称取3.0 g,加入30 mL蒸馏水,匀浆15 s,间隙10 s,重复2次,静置5 min后取上清液,将pH计电极插入匀浆液测定,每个测试样品重复3次,记录测量值并取平均值。

1.2.4 色差测定

使用自动色度计测量冷藏鸡肉样品的颜色。在使用之前,采用仪器随附的白色校准板对仪器进行校

准。校对亮度值 L^* (从黑色 0 到白色 100), 绿红色色度值 a^* (从绿色-60 到红色+60) 和蓝黄色色度值 b^* (从蓝色-60 到黄色+60) [13]。每个测试样品重复 3 次, 记录测量值并取平均值。

1.2.5 质构测定

沿鸡肉肌纤维方向修切成长方体样品 ($1.5\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$), 使用 TA-XT2i 质构仪圆形探头测定。

1.2.5.1 TPA 测定

将样品在相对湿度为 $(80 \pm 4)\%$, 温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的环境下放置 0.5 h, 测定样品的硬度、弹性、咀嚼性和回复性, 每个肉样重复测定 3 次, 取平均值。设定参数: 测前速度为 3.00 mm/s , 测中速度为 1.00 mm/s , 测后速度为 1.00 mm/s , 压缩比为 50%, 2 次下压间隔时间为 5.0 s, 负载质量为 5.0 g, 每个测试样品重复做 3 次实验, 记录测量值并取平均值。

1.2.5.2 剪切力测定

双片刀 (间距为 1.0 cm) 沿肌纤维方向分切成多个小肉柱 ($1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 3\text{ cm}$), 选择楔形探头和 Warner-Bratzler shear force blade 模式, 剪切速度设为 0.83 mm/s , 沿肌纤维垂直方向剪切肉柱, 记录剪切力值, 每组测试样品重复做 3 次实验, 取其平均值。

1.2.6 热物性测定

取 16~18 mg 样品, 放入铝制样品盘中密封后, 迅速放入 DSC 分析仪中, 在 30°C 下平衡 2 min。从 30°C 开始分别以 2, 3, 5°C/min 升到 90°C , 确定 1 个最佳的扫描升温速度。以此温度速率进行升温, 分别得到各组的热流曲线, 再用 DSC-Analysis 软件分析图谱, 分别计算各组的变性温度和变性焓。每组 3 个样品, 记录测量值并取平均值。

1.2.7 鸡肉中水分分布的测定

取 2 g 样品, 放入核磁仪中进行测定。核磁测定参数: 温度为 32°C , 质子共振频率主频为 22 MHz, 自旋-自旋弛豫时间 t_2 用 CPMG 序列进行测量, 回波时间 τ 值 (90° 脉冲和 180° 脉冲之间的时间) 为 $200\text{ }\mu\text{s}$, 重复间隔时间为 1800 ms, 重复采样 4 次, 回波数量为 800, 每个测试样品重复做 3 次实验。弛豫时间用 t_{20}, t_{21}, t_{22} 表示, 对应峰面积用 P_{20}, P_{21}, P_{22} 表示。

1.2.8 数据处理

使用 SPSS 18.0 进行 one-way ANOVA 单因素方差分析, 用 Duncan 多重比较分析差异的显著性, 数据表示为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$), $P<0.05$ 被认为是显著的。

2 结果与分析

2.1 冷却方式对降温速率的影响

由图 1 可知, 样品的中心温度冷却到终温时,

AC 组、VC 组和 IVC 组所用时间分别为 38, 12, 23 min, 平均降温速率分别为 0.42, 1.5, 0.93°C/min 。VC 的降温速率是 AC 的 3.5 倍, IVC 的降温速率是 AC 的 2.2 倍。3 种冷却方式的降温速率先快后慢, 这是由于随着冷却的进行温差变小, VC 组尤为明显。由于传热机理不同, AC 通过对流传热将冷风温度从样品外侧向内传导, 使鸡肉冷却; VC 靠自身水分的蒸发而降温, 其冷却速率更快; 由于 IVC 利用热传导和对流相结合的冷却方式, 所以其冷却速率介于两者之间。预冷开始阶段样品温度较高, 水分含量较高, 冷却降温速率较快, 水分逐渐蒸发后, 样品与环境的温差减小, 冷却速率降低。

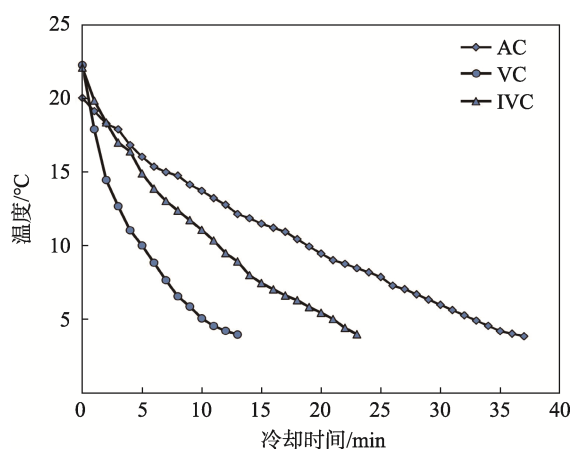


图 1 3 种冷却方式的降温速率
Fig.1 Cooling rates of three cooling methods

2.2 冷却方式对质量损失率的影响

由图 2 可知, AC 组、VC 组和 IVC 组质量损失率分别为 $(3.72 \pm 0.23)\%$, $(5.61 \pm 0.18)\%$, $-(0.23 \pm 0.12)\%$ 。AC 组的质量损失率介于 VC 组和 IVC 组之间, 可能是长时间的冷风冷却导致表面水分蒸发的原因; VC 组的质量损失率最大, 这是由于 VC 组温度的下降主要依靠鸡肉自身水分的蒸发, 因此冷却后的质量损失显著高于其他组; IVC 组的质量损失率为负值, 可能是冷却过程中, 将鸡肉浸泡在水中, 其周围液体阻碍了水分的蒸发, 冷却结束后真空室压力回升, 差压使部分水渗入样品, 故冷却后质量上升 [14]。综上可知, 经 IVC 处理后鸡肉的质量损失率最低。

2.3 冷却方式对 pH 的影响

pH 值直接影响着肉的嫩度和保水性等品质参数, 从而影响肉制品的货架期。在一定范围内, pH 值越高, 肉的保水性越好 [15]。由图 3 可知, 对照组、AC 组、VC 组和 IVC 组的 pH 值分别为 5.76, 5.51, 5.66, 5.73。与对照组相比, 冷却后鸡肉的 pH 值均有所下降, 其中 AC 组显著降低 ($P<0.05$), VC 组和 IVC 组与对照组相比没有显著性差异 ($P>0.05$)。AC

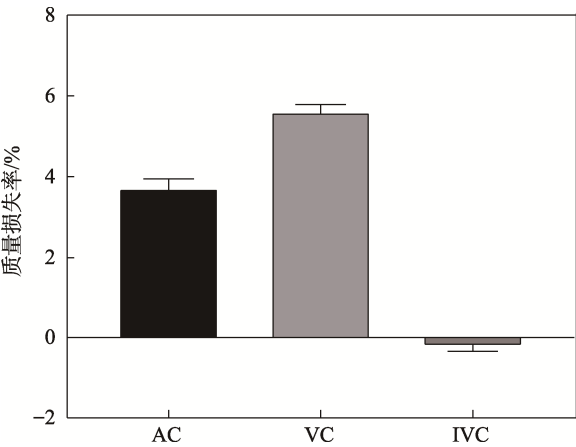


图 2 不同冷却方式对鸡肉质量损失率的影响
Fig.2 Effect of different cooling methods on weight loss rate of chicken meat

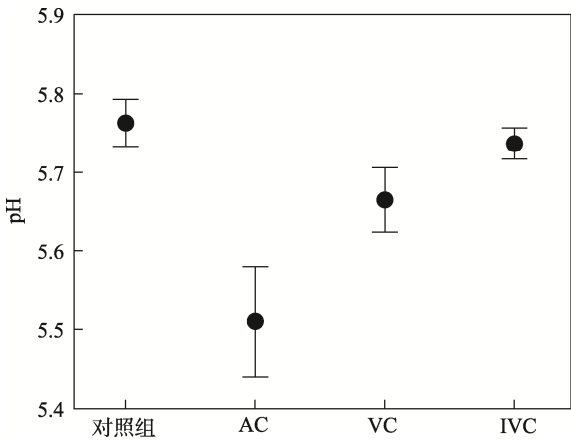


图 3 不同冷却方式对鸡肉 pH 的影响
Fig.3 Effect of different cooling methods on pH of chicken meat

组的冷却时间最长，肌肉的糖酵解速度较快，乳酸积累较多，导致 pH 值的差异最显著。杨若波等^[16]对猪肉持水性的研究表明，pH 值在短时间内急剧下降，使肉的持水性降低，汁液损失严重，很大程度上降低了肉的品质，进而极易形成 PSE 肉。对比 3 种冷却结果可知，IVC 能有效缓解 pH 值的降低。

2.4 冷却方式对色差的影响

不同冷却方式下鸡肉的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值见表 1。与对照组相比，风冷组和 VC 组的 L^* 值显著降低 ($P<0.05$)， a^* 值和 b^* 值显著升高 ($P<0.05$)，IVC 组鸡肉的 L^* 值显著增加 ($P<0.05$)， a^* 值和 b^* 值虽然有所降低但是没有发生显著性变化 ($P>0.05$)。这可能是因为风冷组和 VC 组失水较多，色素累积，导致 L^* 值降低， a^* 值和 b^* 值升高。由于 IVC 组在冷却过程中，肉块始终浸没在水中，因此冷却后肉块表面 L^* 值显著增加， a^* 值和 b^* 值减小。

2.5 冷却方式对质构的影响

由表 2 可知，与对照组相比，AC 组和 VC 组鸡肉的硬度、咀嚼性和剪切力都显著升高 ($P<0.05$)，弹性和回复性显著降低 ($P<0.05$)。IVC 组肉的弹性显著增加 ($P<0.05$)，咀嚼性和剪切力显著减小 ($P<0.05$)，其余质构指标均与对照组没有显著性差异 ($P>0.05$)。风冷组由于冷却过程中表面失水，导致硬度和剪切力显著升高。虽然 VC 组冷却耗时短，但是冷却过程水分蒸发导致失水较多，同样造成冷却后硬度和剪切力上升。IVC 组鸡肉周围的浸没液阻碍了水分的蒸发，样品失水较少，冷却后肉的弹性和回复性与其他实验组相比较好。

表 1 不同冷却方式对色差的影响
Tab.1 Effect of different cooling methods on color difference

组别	L^* 值	a^* 值	b^* 值
对照组	52.14±3.16 ^b	2.75±0.52 ^a	16.47±4.17 ^a
AC 组	50.47±2.28 ^a	3.44±0.71 ^b	19.71±2.58 ^b
VC 组	51.02±1.16 ^a	4.50±10.45 ^c	21.04±2.09 ^c
IVC 组	58.10±2.28 ^c	2.51±0.36 ^a	15.52±1.17 ^a

注： L^* 为亮度， a^* 为红度， b^* 为黄度；同列不同字母表示显著差异 ($P<0.05$)

表 2 冷却方式对质构的影响
Tab.2 Effect of cooling methods on texture

组别	硬度	弹性	咀嚼性	回复性	剪切力
对照组	2121.44±27.71 ^a	0.67±0.07 ^b	1823.36 ±27.05 ^b	0.20±0.03 ^b	38.78±31.04 ^b
AC 组	3528.24±49.17 ^c	0.51±0.03 ^a	1799.40±49.66 ^c	0.17±0.02 ^a	42.12±36.16 ^c
VC 组	2933.22±51.81 ^b	0.58±0.03 ^a	1701.26±67.73 ^c	0.18±0.02 ^a	42.15±61.56 ^c
IVC 组	1856.55±68.68 ^a	0.71±0.02 ^c	1318.15±38.28 ^a	0.23±0.03 ^c	34.60±42.79 ^a

注：同列标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.6 冷却方式对肌蛋白的影响

变性温度反映了蛋白质稳定性, 变性温度越高, 其稳定性也高; 变性焓值反映了鸡肉蛋白质的变性程度, 变性焓值越小, 蛋白质变性越严重, 抗变性能力越弱^[17]。结果显示, 采用 5 °C/min 的升温速率可得到鸡肉蛋白 3 个完整的峰 (图 4)。文献显示^[18-19], 峰 I 代表肌球蛋白头部变性而引起的热流变化, 峰 II 代表肌球蛋白尾部和肌浆蛋白变性引起的热流变化, 峰 III 代表肌动蛋白变性引起的热流变化。

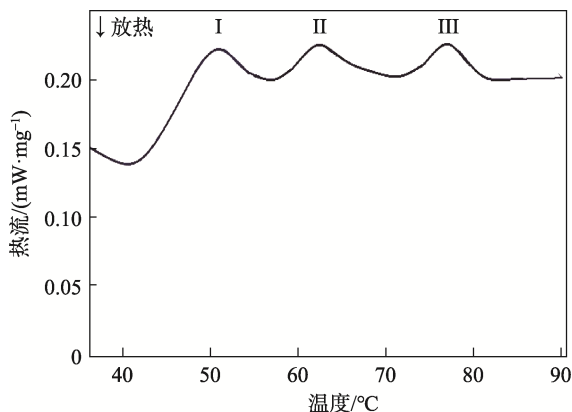


图 4 鸡胸肉蛋白质的 DSC 热流图

Fig.4 DSC heat flow diagram of chicken breast protein

由表 3 可知, 除 IVC 组外, 不同的冷却方式对鸡肉肌球蛋白、肌浆蛋白和肌动蛋白的变性温度和变

性焓值均存在显著性差异 ($P<0.05$)。与对照组相比, 实验组的变性焓值均减小, 表明在冷却过程中, 3 种蛋白质均发生不同程度的变性。IVC 组的变性焓和变性温度也有所减小, 与对照组相比均没有显著性差异, 说明 IVC 后蛋白质的变性程度较小。对猪肉的研究显示^[20], 肌球蛋白头部对温度最敏感, 肌球蛋白尾部和肌浆蛋白对 pH 的变化较为敏感。AC 组早期降温速度慢, 蛋白酶活性高, 使鸡肉处于一个低 pH 值和相对高温的状态, 导致 AC 组蛋白质变性最为严重。另外, AC 组冷却时间较长, 也可能导致蛋白质尤其是肌球蛋白的变性。

2.7 冷却方式对水分分布的影响

不同预冷方式的鸡胸肉弛豫信号衰减的反演图谱见图 5, 以横向弛豫时间 (t_2) 的变化及其峰面积来衡量样品中水分的分布^[21]。由图 5 可知, 1~10 ms 的峰 t_{2b} 代表与大分子紧密结合的水, 称为结合水; 10~100 ms 的峰 t_{21} 代表与肌原纤维内截留的不易流动水; t_{22} 表示肌束间和肌浆蛋白中的自由水^[22-23]。弛豫时间可表示水分的自由度^[24], 弛豫时间越长说明水与底物的结合越松散。可以通过鸡肉弛豫时间的变化来反映冷却过程中鸡肉内部水分迁移变化的规律^[10]。图 5 显示与对照组相比, 风冷组的弛豫时间显著增加, 峰值后移; IVC 组的弛豫时间显著减小, 峰值前移; VC 组与对照组没有显著变化。

表 3 不同冷却方式处理后鸡肉的 DSC 参数

Tab.3 DSC parameters of chicken meat treated with different cooling methods

组别	峰 I 肌球蛋白头部		峰 II 肌球蛋白尾部和肌浆蛋白		峰 III 肌动蛋白	
	变形温度/°C	变性焓/(J·g ⁻¹)	变形温度/°C	变性焓/(J·g ⁻¹)	变形温度/°C	变性焓/(J·g ⁻¹)
对照组	55.43±0.39 ^c	0.39±0.16 ^c	66.13±0.69 ^c	0.40±0.07 ^c	78.52±0.61 ^{bc}	0.40±0.11 ^b
AC 组	52.15±0.40 ^a	0.24±0.09 ^a	63.27±0.37 ^a	0.21±0.09 ^a	76.37±0.73 ^a	0.30±0.03 ^a
VC 组	53.90±0.23 ^b	0.30±0.05 ^b	64.36±0.49 ^b	0.26±0.04 ^{ab}	77.54±0.58 ^b	0.32±0.12 ^a
IVC 组	54.39±0.36 ^{bc}	0.34±0.02 ^{bc}	65.71±0.63 ^c	0.36±0.07 ^c	77.81±0.91 ^b	0.37±0.05 ^b

注: 同列标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

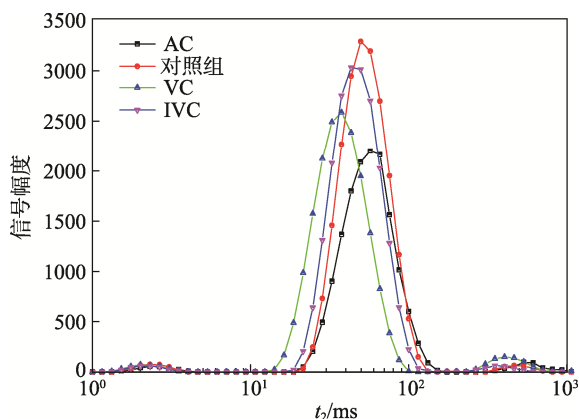


图 5 不同预冷方式的鸡胸肉弛豫信号衰减的反演图谱

Fig.5 Distribution of t_2 relaxation time under different cooling methods

不同冷却方式下, t_2 及其相对面积的影响见表 4, P_{2b} , P_{21} , P_{22} 表示 3 种状态水的相对面积, 代表样品中不同组分水的相对含量。由表 4 可知, 与新鲜肉相比, 3 种不同冷却方式下, t_{2b} 变化不明显, 且其相对面积也没有显著变化, 说明冷却方式对鸡肉结合水的影响较小。IVC 组 t_{21} 显著降低, 且相对峰面积显著减小, 这说明 IVC 处理后, 样品中不易流动水减少。自由水相对峰面积显著增加, 可能是因为 IVC 组样品吸收的水以游离的形式存在, 导致冷却后自由水所占的比例增加, 从而使得原本占比很大的不易流动水的比例显著下降。风冷组 t_{21} 显著增加, 且这部分水的相对峰面积显著减小, 可能是风冷后鸡肉的不易流动水自由度增大, 逐渐转化为自由水。风冷组 pH

表 4 冷却方式对鸡胸肉中水分的影响
Tab.4 Effects of cooling methods on the water content of chicken breast

处理 方式	结合水		不易流动水		自由水	
	t_{2b}/ms	$P_{2b}/\%$	t_{21}/ms	$P_{21}/\%$	t_{22}/ms	$P_{22}/\%$
对照组	2.56±0.25 ^b	5.42±0.74 ^b	49.82±1.16 ^b	93.47±0.32 ^b	464.68±12.35 ^b	1.11±0.55 ^a
AC 组	2.60±0.15 ^b	5.37±0.40 ^b	57.57±0.38 ^c	92.74±0.03 ^a	533.77±20.07 ^c	1.89±0.07 ^b
VC 组	2.52±0.02 ^b	5.38±0.29 ^b	43.65±0.50 ^b	93.20±1.09 ^b	453.72±31.75 ^b	1.42±0.43 ^a
IVC 组	2.50±0.02 ^b	5.40±0.06 ^b	38.71±0.43 ^a	92.30±0.77 ^a	351.93±23.42 ^a	2.30±0.37 ^c

注：同列标不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）

值较低，肌纤维受损，肌纤维间的通透性增加，增大了自由水占比。实验结果表明，快速冷却能显著提高鸡肉的持水力和保水性。

3 结语

以三黄鸡为研究对象，采用 AC，VC，IVC 这 3 种冷却方式，对比分析了冷却效果（降温速率、质量损失率）、冷却后鸡肉品质（pH 值、色差和质构），并且使用 DSC 和 LF-NMR 技术分析了冷却后鸡肉中蛋白质、水分分布和各组分的变化，探讨了不同冷却方式对冷鲜鸡品质的影响。得出以下结论。

1）VC 组降温速率最快但质量损失率较大，不利于企业的生产效益，IVC 能明显地改善这一问题，且降温速率比风冷更快。

2）VC 组和 IVC 组能显著延缓鸡肉 pH 值的降低，说明较大的降温速率能有效缓解 pH 的降低。经 IVC 处理的鸡肉外表更光鲜，销售品相更好，且 IVC 处理后鸡肉的弹性和剪切力显著优于对照组，可以较好地改善冷鲜鸡肉的品质。

3）不同冷却方式处理后，VC 和 IVC 能有效地抑制鸡胸肉蛋白质的变性，更有利于提高鸡肉的保水性。根据冷却后鸡肉中水分 NMR 的弛豫变化规律可知，VC 和 IVC 具有较低的 t_2 ，冷却速率增加能显著提高鸡肉的保水性和持水力。

VC 和 IVC 这 2 种冷却方式都能在一定程度上改善鸡肉品质，在实际的生产过程中，要根据食品品质特性选择更合适的冷却方法。对于冷鲜肉，采用多种冷却方式共同处理可改善鸡肉的感官品质；水分是影响冷鲜鸡品质的重要因素，可通过石蜡切片从微观结构上综合分析冷却对鸡肉品质的影响。

参考文献：

[1] 王琳, 赵建梅, 刘娜, 等. 我国生鲜畜禽产品消费偏好及其安全关注点分析[J]. 中国动物检疫, 2021, 38(2): 68—74.
WANG Lin, ZHAO Jian-mei, LIU Na, et al. Analysis

on the Consumption Preference for Fresh Livestock and Poultry Products and Concerns for Their Safety in China[J]. China Animal Health Inspection, 2021, 38(2): 68—74.
[2] WARNER R D, JACOB R H, ROSENVOLD K, et al. Altered Post-Mortem Metabolism Identified in Very Fast Chilled Lamb M Longissimus Thoracis et Lum-borum Using Metabolomic Analysis[J]. Meat Science, 2015, 108: 155—164.
[3] 陈华, 刘宝林. 我国鸡肉冷加工发展现状[J]. 冷藏技术, 2016(4): 1—5.
CHEN Hua, LIU Bao-lin. Development of Cold Processing of Chicken in China[J]. Journal of Refrigeration Technology, 2016(4): 1—5.
[4] SONG Xiao-yan, SONG Zuo, LIU Bao-lin, et al. Effect of Vacuum Cooling on Stability of Macro-Porous Sausage during Refrigerated Storage—Vacuum-Cooled Sausage Has a Longer Shelf Life[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(5): 2223—2233.
[5] 梁豪, 田怀文, 杨文哲. 真空预冷技术及其在果蔬方面的应用和发展前景[J]. 科技创新与生产力, 2020(11): 75—77.
LIANG Hao, TIAN Huai-wen, YANG Wen-zhe. Vacuum Pre-Cooling Technology and Its Application and Development Prospect in Fruits and Vegetables[J]. Sci-Tech Innovation and productivity, 2020(11): 75—77.
[6] MCDONALD K, SUN Da-wen. Vacuum Cooling Technology for the Food Processing Industry: A Review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(2): 55—65.
[7] DONG Xiao-guang, CHEN Hui, LIU Yi, et al. Feasibility Assessment of Vacuum Cooling Followed by Immersion Vacuum Cooling on Water-Cooked Pork[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 199—203.
[8] CHENG Qiao-fen, SUN Da-Wen. Feasibility Assessment of Vacuum Cooling of Cooked Pork Ham with Water Compared to that Without Water and with Air Blast Cooling[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2006, 41(8): 938—945.
[9] FENG Chao-Hui, WANG Wei, MAKINO Y, et al. Evaluation of Storage Time and Temperature on Phy-

- sicochemical Properties of Immersion Vacuum Cooled Sausages Stuffed in the Innovative Casings Modified by Surfactants and Lactic Acid[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 257: 34—43.
- [10] 辜雪冬, 孙术国, 杨飞艳, 等. 冰温或冷藏对牦牛肉贮藏品质及水分迁移的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 343—350.
- GU Xue-dong, SUN Shu-guo, YANG Fei-yan, et al. Effects of Ice Temperature or Chilled Storage on Quality and Moisture Migration of Yak Meat[J]. *Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(16): 343—350.
- [11] DAWSON P L, HAN I Y, VOLLER L M, et al. Film Oxygen Transmission Rate Effects on Ground Chicken Meat Quality[J]. *Poult Science*, 1995, 74(8): 1381—1387.
- [12] SONG Xiao-yan, LIU Bao-lin. The Optimization of Volumetric Displacement Can Uniformize the Temperature Distribution of Heated Ham during a Vacuum Cooling Process[J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20(1): 43—49.
- [13] WANG Yao, LIANG Hong, XU Ru-ying, et al. Effects of Temperature Fluctuations on the Meat Quality and Muscle Microstructure of Frozen Beef[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 116: 1—8.
- [14] 陈华, 刘宝林, 宋晓燕, 等. 不同真空冷却方式对水煮猪肉块不同部位品质的影响[J]. *制冷学报*, 2016, 37(4): 112—118.
- CHEN Hua, LIU Bao-lin, SONG Xiao-yan, et al. Effect of Different Vacuum Cooling Methods on the Qualities of Different Parts of Water-Cooked Pork[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(4): 112—118.
- [15] 尹忠平, 夏延斌, 李智峰, 等. 冷却猪肉 pH 值变化与肉汁渗出率的关系研究[J]. *食品科学*, 2005(7): 86—89.
- YIN Zhong-ping, XIA Yan-bin, LI Zhi-feng, et al. Study on Relationship Between Postmortem pH Change and Purge Loss in Chilled Pork Meat[J]. *Food Science*, 2005(7): 86—89.
- [16] 杨波若, 李华健, 苏娅宁, 等. 猪宰后背最长肌中 μ -calpain、pH 和骨架蛋白变化与持水性的关系[J]. *食品工业科技*, 2021(1): 1—13.
- YANG Bo-ruo, LI Hua-jian, SU Ya-ning, et al. Relationship Among Changes of μ -Calpain, pH and Skeleton Protein and Water Holding Capacity of Post-Mortem Pork[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021(1): 1—13.
- [17] PALKA K, DAUN H. Changes in Texture, Cooking Losses and Myofibrillar Structure of Bovine M Semitendinosus during Heating[J]. *Meat Science*, 1999, 51(3): 237—243.
- [18] LARREA-WACHTENDORFF D, TABILO-MUNIZAGA G, MORENO-OSORIO L, et al. Protein Changes Caused by High Hydrostatic Pressure (HHP): A Study Using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy[J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(2): 222—230.
- [19] TAMILMANI P, PANDEY M C. Thermal Analysis of Meat and Meat Products[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, 123(3): 1899—1917.
- [20] DENG Y, ROSENVOLD K, KARLSSON A H, et al. Relationship Between Thermal Denaturation of Porcine Muscle Proteins and Water-Holding Capacity[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(5): 1642—1647.
- [21] SHAO Jun-hua, DENG Ya-min, SONG Li, et al. Investigation the Effects of Protein Hydration States on the Mobility Water and Fat in Meat Batters by LF-NMR Technique[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 66: 1—6.
- [22] BERTRAM H C, ANDERSEN H J. NMR and the Water-Holding Issue of Pork[J]. *Anim Breed Genet*, 2007, 124(S1): 35—42.
- [23] HAN Ming-yi, WANG Peng, XU Xing-lian, et al. Low-Field NMR Study of Heat-Induced Gelation of Pork Myofibrillar Proteins and Its Relationship with Microstructural Characteristics[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 1175—1182.
- [24] CHALAND B, MARIETTE F, MARCHAL P, et al. ^1H Nuclear Magnetic Resonance Relaxometric Characterization of Fat and Water States in Soft and Hard Cheese[J]. *The Journal of Dairy Research*, 2000, 67(4): 609—618.