不同冷却速率快速冷却预处理后鸡胸肉冷藏期水分与新鲜度品质的变化

毕鹏慧，朱焕婷，王盼琪，邹金浩，唐道邦，王旭苹*

（广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所，农业农村部功能食品重点实验室，广东省农产品加工重点实验室，广东广州 510610）

摘要：鸡肉因蛋白含量高且价格低廉已逐步成为肉类消费的主体。为了解决生鲜鸡肉贮藏期水分损失和品质劣变的产业痛点，本研究以冰箱 4 ℃冷却为对照组，RP-I（冷却速率为 4.68±0.01 ℃ min^{-1}），RP-II（冷却速率为 9.13±0.07 ℃ min^{-1}）和 RP-III（冷却速率为 14.86±0.08 ℃ min^{-1}）为实验组，探讨了快速冷却预处理对鸡胸肉失水率及新鲜度的影响。结果表明：快速预冷处理后，鸡胸肉在 4 ℃贮藏过程中，剪切力下降幅度减小、挥发性盐基氮含量升高受到抑制，同时离心损失和蒸煮损失降低，肌苷酸含量增加；在本实验条件下，较高冷却速率组总体表现出较好的保水性或新鲜度相关指标。贮藏第 7 d 时，RP-III 组蒸煮损失较对照组显著降低 14.59%（$P<0.05$），同时离心损失显著下降 15.27%（$P<0.05$），肌苷酸含量较对照组提升 25.12%（$P<0.05$）。上述有益效果主要归因于蛋白质降解程度的降低，并通过三氯乙酸可溶性肽含量、肌原纤维碎片化指数以及肌纤维间隙的降低得到验证，同时 ATP 酶活性也受到抑制。此外，T_{22} 与 T_{23} 峰面积百分比的相反变化，以及水分子氢质子密度较高且分布更均匀，表明快速冷却预处理可能与抑制不易流动水向自由水的转化，减少鸡胸肉的水分流失有关。本研究成果为生鲜鸡肉的减损保鲜提供了技术支撑。

关键词：冰鲜鸡肉；快速冷却；失水率；新鲜度；冷藏

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0700

The Changes in Moisture and Freshness Quality of Chicken Breast During the Refrigeration Storage After Rapid Chilling Pretreatment With Different Cooling Rates

BI Penghui, ZHU Huanting, WANG Panqi, ZOU Jinhao, TANG Daobang, WANG Xuping*

(Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Chicken has gradually become the main source of meat consumption due to its high protein content and low price. To address the industrial key points of moisture loss and quality deterioration of fresh chicken during storage. In this study, refrigeration at 4 ℃ served as the control group, whilst RP-I (cooling rate of 4.68±0.01 ℃ min^{-1}), RP-II (cooling rate of 9.13±0.07 ℃ min^{-1}) and RP-III (cooling rate of 14.86±0.08 ℃ min^{-1}) as experimental groups, with the aim of investigating the effects of rapid chilling pretreatment on water loss and freshness of chicken breast. Results indicated that rapid chilling pretreatment significantly lowered the decrease of shear force and the increase of TVB-N values, also lessened centrifugal and cooking loss, whereas enhanced inosine monophosphate (IMP) content of chicken breast during storage at 4 ℃. On day 7 of storage, the cooking loss of RP-III group was significantly decreased by 14.59% ($P<0.05$), the centrifugal loss was significantly reduced by 15.27% ($P<0.05$), and the inosine monophosphate (IMP) content was increased by 25.12% compared with the control group ($P<0.05$). These beneficial effects were attributed to reducing of protein degradation which was confirmed by decreasing of TCA-soluble

收稿日期：2026-05-08；修回日期：2026-09-13；接受日期：2026-09-14

基金项目：国家重点研发计划重点专项（2022YFD2100500）；广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目（2026CXTD16）；高水平农科院建设专项资助（NYQS202623）；广东省科学技术协会青年科技人才培育计划（SKXRC2025473）；广东省农业科学院青年托举人才项目（R2026 PY-TJ024）；云浮市科技计划项目（2025020201）

作者简介：毕鹏慧（2001-），女，硕士研究生，研究方向：畜产品加工科技，E-mail：18835709141@163.com

通讯作者：王旭苹（1988-），女，博士，副研究员，研究方向：肉品加工科学与技术，E-mail：wangxuping@gdaas.cn

peptide content, myofibrillar fragmentation index (MFI) values and fiber space, and also inhibiting ATPase activity. Furthermore, the inverse changes of the peak area percentages of T_{22} and T_{23} as well as higher and uniform hydrogen proton density of water molecules indicated that the rapid chilling pre-treatment reduced the water loss by lowering the transfer of immobilized water to free water in chicken breast. The results of this research provided technical support for the loss reduction and preservation of fresh chicken.

Key words: chilled chicken; rapid cooling; moisture loss; freshness; refrigerated

鸡肉因其高蛋白、低脂肪的营养特性而广受消费者青睐[1]。与白羽鸡相比，黄羽鸡因其肉质更为细嫩而深受消费者喜爱，其消费量约占我国鸡肉市场总量的 50%[2]。一般而言，为保证鸡肉新鲜度及优良的感官品质，黄羽鸡通常需在宰后 2 h 内进行烹调[3]。然而，自 2015 年我国全面禁止活禽销售以及防控禽流感疫情以来，冷藏鸡肉（0~4 ℃）逐渐取代活鸡成为市场主流。受加工与贮藏周期延长的影响，冷藏鸡肉易出现新鲜度下降及水分流失等问题，不仅影响其食用的感官品质，还会导致可销售产品损失而造成经济损失[4]。因此，提高冷藏鸡肉新鲜度和减少水分流失的有效技术已成为科学界关注的焦点。

研究表明，畜禽宰后肌肉组织中仍存在一定的代谢活性，以维持体内稳态平衡[5]。在此过程中，三磷酸腺苷（Adenosine Triphosphate，ATP）不断被消耗，并生成肌苷酸（Inosine Monophosphate，IMP）和次黄嘌呤（Hypoxanthine，Hx）等代谢产物，这些物质对熟制鸡肉的风味具有重要影响[6]。同时，鲜肉中约含 75%的水分[1]，在贮藏过程中水分易从肌肉中析出，从而引起肉品嫩度及风味的变化[7]。超快速冷却技术可在宰后短时间内迅速降低畜禽肉中心温度，可有效延缓宰后生理生化反应进程，抑制蛋白质降解，减缓肉品发生宰后僵直，并降低表面微生物数量[8,9]。此外，由水分流失造成的经济损失远高于冷却过程中的能耗成本[10]。Fernandez 等[11]研究表明，快速冷却处理组的羊肉颜色、保水性和感官评估结果与冰箱 4 ℃传统冷却处理组有显著差异。然而现有研究主要集中于牛、羊肉，对于鸡肉，尤其是其新鲜度与水分变化的调控机制仍缺乏系统研究。

因此，本研究采用液氮冷冻技术实现不同速率的快速冷却预处理，系统评估其对鸡胸肉在冰箱 4 ℃贮藏过程中水分流失及新鲜度变化的影响，并从水分分布与迁移、蛋白质降解以及能量代谢等方面阐明其作用机制。通过测定离心损失与蒸煮损失评价样品的失水程度，以 IMP 含量表征新鲜度变化，同时结合 ATP 酶活性以及 ATP 与 Hx 含量的动态变化，解析其内在生化机制。研究结果可为降低冷藏鸡胸肉贮藏过程中的水分流失、维持其新鲜度提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

硼酸、硫酸、碳酸钾、甲基红、溴甲酚绿、无水乙醇、碳酸氢二钾、乙二胺四乙酸、氯化镁（分析纯），天津福辰化学试剂有限公司；三氯乙酸、高氯酸，天津福辰化学试剂有限公司；总蛋白定量测定试剂盒、超微量 ATP 酶试剂盒，南京建成生物工程研究所；5’-肌苷酸、次黄嘌呤、三磷酸腺苷酸，上海源叶生物科技有限公司；氢氧化钠（分析纯），天津市科密欧化学试剂有限公司；磷酸二氢钾、甲醇（色谱纯），天津市科密欧化学试剂有限公司；石蜡（分析纯），德国 sigma 公司；中性树脂、苏木素、伊红（分析纯），长沙艾碧维生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

DJL-QF 液氮速冻机，深圳市德捷力低温技术有限公司；Picolog TC-08 数据记录器，英国 Pico Technology 公司；K5500 超微量紫外分光光度计，北京凯奥公司；HWS12 电热恒温水浴锅，上海一恒科学仪器有限公司；UV-1800 紫外-可见分光光度，日本岛津；TGL-16M 冷冻高速离心机，湖南湘仪仪器有限公司；C-LM4 电脑测控型肌肉嫩度仪，北京天翔飞域科技有限公司；LC1260 高效液相色谱仪，安捷伦科技有限公司；NM42-040H-I 低场核磁共振分析仪，上海纽迈科技公司；T25D 均质机，德国 IKA 集团；电热鼓风干燥箱，上海一恒科学仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的制备和冷却处理

鸡胸肉取自广州江丰工业有限公司（中国广州）的一个商业屠宰场，选取了 75 日龄、光鸡约 2.0 斤的江村黄鸡。屠宰后，立即收集鸡胸肉。然后将它们打包在泡沫盒中，并放入冰块，2 h 内送往实验室。

选取大小、厚薄均匀，去皮去脂的鸡胸肉进行真空包装，并随机分为四组，每组取三块鸡胸肉进行三个不同的实验：对照组（未处理），RP-I 组（冷却速率为 4.68±0.01 ℃ min^{-1}），RP-Ⅱ组（冷却速率为 9.13±0.07 ℃ min^{-1}），以及 RP-III组（冷却速率为 14.86±0.08 ℃ min^{-1}）。空白对照组样品经真空包装后，直接置于冰箱 4 ℃恒温环境中储存。本研究采用 4 ℃冰箱贮藏作为对照组，是提供未经过快速预冷预处理的基准样品，并排除其他冷却工艺的干扰，直观反映不同速率快速预冷处理对鸡胸肉贮藏品质的改善效果，同时也模拟生鲜肉未经快速预冷直接进入家用冷藏的消费场景。对于 RP-I、RP-II和 RP-III处理组，使用液氮冷冻机对鸡胸肉进行冷却，将液氮冷冻机的内部温度分别设置为-35、-80 和-125 ℃，温度稳定后，将鸡胸肉放入设备中进行冷却。对于腔室内部温度的选择：腔室内部温度过高（高于-35 ℃），样品无法实现高速快速冷却，冷却速率差异小，难以形成梯度；腔室内部温度过低（低于-125 ℃），冷却速率提升空间有限，极易造成样品表面过度冻结，出现表面结冰现象，破坏肌肉组织，偏离本研究仅做快速预冷、不深度冷冻的实验目标。结合预实验摸索，最终选定-35、-80、-125 ℃三个腔室温度，可获得梯度分明、无表面结冰损伤的 3 档冷却速率能够满足探究不同快速预冷速率对鸡胸肉贮藏品质影响的实验目的。

实验采用 TC-08 数据记录器实时监测并记录样品温度变化，具体记录方式如下：将温度探头精准放置于鸡胸肉样品表面固定位置，使用防水胶带密封探头接线开口，避免外界环境干扰数据，设置记录频率为每 2 秒采集一次样品表面温度数据，持续记录直至样品表面温度降至目标温度 1 ℃，同时自动留存完整的时间-温度变化曲线，统计降温总时长，用于计算各组样品的平均冷却速率。当鸡胸肉表面温度达到 1 ℃，取出鸡胸肉统一转移至 4 ℃恒温环境中储存 7 天。根据记录的时间-温度曲线，快速冷却组中鸡胸肉的表面温度分别以平均 4.68、9.13 和 14.90 ℃ min^{-1} 的速率达到目标温度。

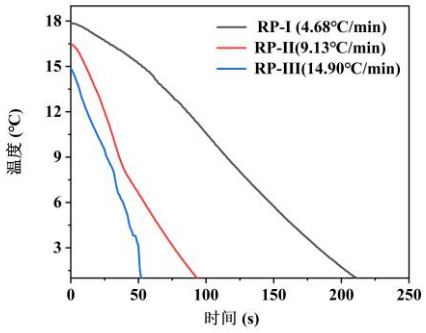


图 1 快速预冷对鸡胸肉温度的影响

Fig.1 The effect of rapid precool on temperature of chilled chicken meat

1.3.2 快速预冷对鸡胸肉水分损失的测定

1.3.2.1 离心损失

离心损失参考 Rinwi 等[12]的方法，并稍作修改。先用滤纸去除鸡胸肉表面水分。然后将肉切割以获得中心肉块（5±0.50 g），称重（M_1）后用吸水纸包裹，然后放入含有吸水棉的 50 mL 离心管中。在 4 ℃、4 000×*g* 的条件下离心 10 min 后，用滤纸去除肉样表面的水分并称重（M_2）。鸡胸肉的离心损失是通过以下公式计算的：

$$A=\frac{M_1-M_2}{M_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

A——离心损失率，%;

M_1——鸡胸肉离心前的质量，g;

M_2——鸡胸肉离心后的质量，g。

1.3.2.2 蒸煮损失

蒸煮损失参考 Xu 等[13]的方法，并稍作修改。首先用滤纸去除鸡胸肉表面的水分。然后将肉切成 4.0×3.0×3.0 cm^3 的块状并称重（M_3），随后放入排气后的蒸煮袋中。鸡胸肉在 71 ℃的水浴中煮 35 min，然后用自来水冷却 30 min。用滤纸去除表面水分后，再次称重（M_4）。每组使用三块鸡胸肉，每块鸡胸肉又取三小块进行实验。鸡胸肉的蒸煮损失是通过以下公式计算的：

$$B=\frac{M_3-M_4}{M_3}\times 100\% \quad (2)$$

式中:

B——蒸煮损失率，%;

M_3——鸡胸肉蒸煮前的质量，g;

M_4——鸡胸肉蒸煮后的质量，g。

1.3.2.3 水分分布和迁移

水分分布和迁移的测量是使用低场核磁共振参考 Liu 等[14]的方法进行的，并进行了一些修改。鸡胸肉被切成块（1.0×1.0×4.0 cm^3，约 2.0 g）并用塑料膜包裹。使用 Carl-Purcell-Meiboom-Gill（CPMG）序列来分析弛豫时间（T_2），分别使用 15 和 30 μs 的 90° 和 180° 脉冲。测量条件：扫描次数为 4，扫描时间=1 500 ms，回波时间为 0.4 ms，回波次数为 13 000，探头直径为 40 mm。

CPMG 测试之后，参考 Liu 等[14]的方法，通过磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging，MRI）获取氢质子的分布。

1.3.3 快速预冷对鸡胸肉蛋白质降解的测定

1.3.3.1 TCA 溶解肽

TCA 溶解肽的含量测定参考 Li 等[15]的方法。首先称量 2.0 g 鸡胸肉肉糜，加入 18 mL 预冷的体积分数为 5%三氯乙酸溶液，进行匀浆（10 000 r·min^{-1}，30 s，两次），再 4 ℃，10 000 r·min^{-1} 离心 5 min 后取上清液，测定上清液中酪氨酸（Tyr）的含量，结果表示为 μmol Tyr/g。

1.3.3.2 肌原纤维小片化指数（Myofibrillar Fragmentation Index，MFI）

MFI 的测定参考 Li 等[15]的方法，并做了一些调整。称取 2 g 样品，切碎后加入 20 mL 预冷的 MFI 缓冲液（100 mmol·L^{-1} KCl，20 mmol·L^{-1} K_2HPO_4，1 mmol·L^{-1} EDTA，1 mmol·L^{-1} $MgCl_2$，pH 值为 7.0）在冰浴中以 10 000 r·min^{-1} 高速均质 1 min。然后，将匀浆液在 3 000×*g*、4 ℃条件下离心 15 min。收集沉淀物，加入 5 mL MFI 缓冲液将沉淀悬浮，用 20 目筛网过滤结缔组织，再加 5 mL MFI 缓冲液冲洗管子，使肌原纤维通过筛孔，盒测量悬浮液的蛋白质浓度，并调整至 0.50±0.05 mg·mL^{-1}，然后检测 540 nm 处的吸光度，将结果乘 200 后即可得到 MFI。

1.3.3.3 微观结构

参考 Liu 等[14]的方法，并稍作修改。取样均选取鸡胸肉相同部位，分别沿肌纤维横向、纵向切取小块肉样；固定液采用 4%多聚甲醛溶液，样品置于固定液中固定 24 h 以上，然后在 60 ℃的烘箱中烘烤 12 h。随后，将样本切片置于二甲苯中 20 min，重复 3 次，之后，依次在体积分数为 100%、100%、95%、85%和 75%的乙醇中进行脱水，每个步骤持续 5 min。随后样本切片采用蒸馏水冲洗 5 min。然后，依次用苏木素和伊红进行染色，再用酒精梯度脱水，取出后置于二甲苯中 10 min，重复 2 次。用中性树胶对切片进行封片。用普通光学显微镜进行观察，放大倍数为 40×10。

1.3.4 快速预冷对鸡胸肉鲜度及内源酶活性的测定

1.3.4.1 核苷酸代谢产物

样品的制备参考 Zou 等[16]的方法。取 3 g 样品与 15 mL 体积分数为 10%冷高氯酸混合，将混合物在 10 000×*g* 下匀质 2 min，然后在 4 ℃下以 10 000×*g* 的速度离心 15 min。收集上清液，再用 15 mL 体积分数为 10%冷高氯酸对沉淀物进行提取。合并上清液，使用 0.5 mol·L^{-1} 和 0.05 mol·L^{-1} 的氢氧化钠将 pH 值调至 6.5 至 6.8。将样品置于 4 ℃下 30 min 以沉淀高氯酸。然后在 4 ℃、10 000×*g* 下离心样品 15 min。之后，取 1 mL 上清液过 0.22 μm 滤器过滤，按照 Liu 等[17]的方法，使用高效液相色谱和 ZORBAX SB-C18（250 mm×4.6 mm，5 μm）色谱柱以及紫外检测器（254 nm）进行分析。检测柱温度为 30 ℃，进样量为 20 μL，流速为 0.8 mL·min^{-1}，洗脱程序为 25 min，体积分数为 2%的流动相 B（甲醇）和体积分数为 98%的流动相 A（0.05 mol·L^{-1} 磷酸二氢钾缓冲液）。流动相经

0.45 μm 滤膜过滤超声后使用。通过与标准品保留时间和标曲的对比，结果表示为核苷酸的含量。

1.3.4.2 ATP 酶活力

ATP 酶活性使用商业试剂盒进行测定。

1.3.4.3 剪切力

剪切力的测定参考 Wu 等[18]的方法。将鸡胸肉修剪成 3×1×1 cm^3 条形的肉样。用肌肉嫩度仪垂直于肌纤维的方向测量剪切力，每块肉样测定 6 次，取平均值。

1.3.4.4 挥发性盐基氮（Total Volatile Basic Nitrogen，TVB-N）

TVB-N 参考 Park 等[19]的微量扩散法进行测定。将约 5 g 样品加入 20 mL 蒸馏水中，用均质器进行匀浆，浸泡 30 min 后过滤。在扩散皿的外室中加入 1 mL 滤液，空白组加入蒸馏水。在扩散皿的内室中加入 1 mL，20 g Ł$^{-1}$ 硼酸和一滴指示剂（1 g Ł$^{-1}$ 甲苯红乙醇溶液和 5 g Ł$^{-1}$ 溴甲酚绿乙醇溶液）。盖住盖子并留一个缝隙加入 1 mL 饱和碳酸钾溶液，加入后立即推平磨砂玻璃盖，将扩散皿密封。在 37 ℃下在培养箱中培养 2 h。取出待冷却后，用 0.01 mol Ł$^{-1}$ HCl 滴定扩散皿内室，直至颜色变为蓝紫色。TVB-N 值的计算公式如下：

$$C=\frac{(V-V_0)\times 14\times c\times 100\times a}{m} \quad (3)$$

式中:

C——TVB-N 值，mg/100 g;

V——样品消耗的盐酸体积，mL;

V_0——空白组消耗的盐酸体积，mL;

c——盐酸的物质的量浓度，mol Ł$^{-1}$;

a——稀释倍数;

m——样品重量，g。

1.4 数据分析

每组样品设置 3 个平行组，实验测试重复 3 次，数据表示为平均值±标准差，利用 IBM SPSS Statistics 26 进行误差及显著性分析（其中 $P<0.05$ 具有统计学意义），再用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 快速预冷对鸡胸肉水分损失的影响及机制

2.1.1 水分流失

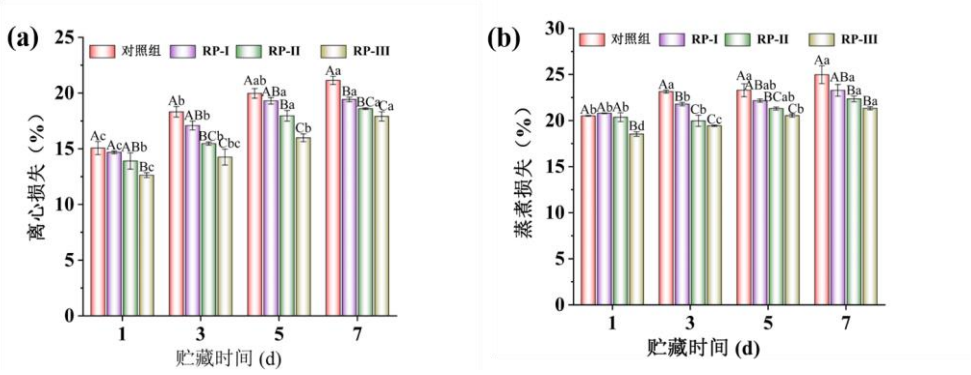


图 2 快速预冷对鸡胸肉水分流失的影响

Fig.2 The effect of rapid precool on the moisture loss of chilled chicken meat

注:（a）离心损失（%）;（b）蒸煮损失（%）。在同一贮藏时间点，不同大写字母表示不同组之间的差异显著（$P<0.05$）。在同一组内，不同小写字母表示不同储存时间的差异显著（$P<0.05$）。下图同。

肉类在储存过程中通常会发生水分流失，造成水溶性肌浆蛋白、肽类、游离氨基酸及多种代谢产物的流失，该现象主要归因于肌肉结构的变化[20,21]。一般而言，持水力较高的肉品往往表现出更优的感官品质与加工特性[22]。因此，在贮藏过程中有效抑制水分流失，对于维持鲜肉的多汁性、嫩度及整体食用品质，并提升其经济价值具有重要意义[23]。肉品水分流失程度通常采用离心损失和蒸煮损失进行评价[24]。

图 2a 描述了不同快速冷却预处理对鸡胸肉离心损失的影响。结果表明，在 4 ℃贮藏 7 d 过程中，各处理组样品的离心损失均随贮藏时间延长而逐渐增加。然而，与对照组相比，快速冷却预处理在整个贮藏期间均显著降低了鸡胸肉的水分流失水平，且随着冷却速率的提高，离心损失呈下降趋势。其中，冷却速率最高的 RP-III组鸡胸肉离心损失最低，相较对照组约降低 15.27%。

蒸煮损失主要反映蛋白质变性过程中样品的质量损失[24]，蒸煮损失越高，说明肌原纤维蛋白在加热过程中维持水分与脂质的能力越弱。如图 2b 所示，所有样品在 4 ℃贮藏 7 d 过程中蒸煮损失均逐渐升高，与离心损失的变化趋势一致。与对照组相比，RP-III预处理在贮藏 1、3、5 和 7 d 后分别显著（P<0.05）降低蒸煮损失 9.64%、16.01%、11.81%和 14.59%。综上，快速冷却预处理能够有效降低鸡胸肉在冷藏过程中的水分流失，显著提高其持水能力，从而改善产品的整体品质。

2.1.2 水分分布及迁移

鲜肉在贮藏过程中的水分流失与肌原纤维结构中水分的分布状态密切相关。一般而言，自由水主要存在于肌原纤维晶格之外，流动性强、易于流失；结合水位于高度有序的结构内部，被束缚于肌原纤维晶格中，难以迁移；而固定水则存在于肌肉纤维与肌原纤维的膜之间，当肌原纤维结构受损时，易向自由水转化并发生迁移[25]。为进一步阐明快速冷却预处理降低水分流失的作用机制，采用低场核磁共振（Low-Field Nuclear Magnetic Resonance，LF-NMR）对肌肉中水分分布及迁移特性进行分析（图 3a）。根据自旋弛豫时间（T_2），水分可划分为 T_{2b}（0~10 ms）、T_{21}（10~100 ms）和 T_{22}（100~1 000 ms）三种类型[26,27]。弛豫时间越短，表明水分流动性越低，而各弛豫峰面积则反映相应水分的含量[25]。

与对照组相比，快速冷却预处理在不同贮藏阶段均显著（P<0.05）提高了 T_2 总峰面积（图 3b），表明其能够有效增加鸡胸肉中的总含水量。在该条件下，随着冷却速率的提高，总含水量呈上升趋势。然而，随着贮藏时间延长，各处理组的总含水量均逐渐下降，这一变化与水分流失规律一致。

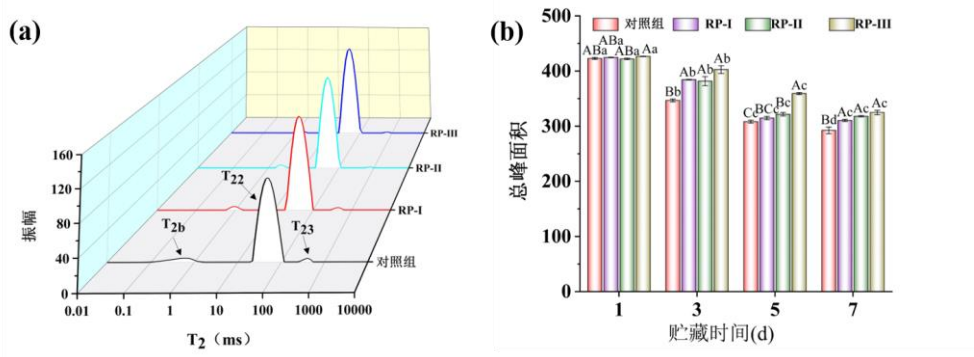


图 3 不同冷藏预处理下鸡胸肉在储存过程中水分子分布和迁移的变化

Fig.3 Changes in distribution and migration of water molecules of chicken breast during storage under different chilling pre-treatments

注:（a）水分子的弛豫时间（T_{2b}、T_{22}、T_{23}）反转谱;（b）T2 的总峰面积。

进一步通过三类水分峰面积百分比分析不同处理条件下鸡胸肉在 7 d 贮藏过程中的水分分布变化（表 1）。结果显示，所有样品中代表自由水的峰面积百分比随贮藏时间延长而逐渐升高，表明自由水含量增加。然而，快速冷却预处理显著降低了自由水所占比例。已有研究表明，贮藏过程中肌肉细胞完整性受损及蛋白质结构变化会导致肌原纤维结构破坏，从而削弱持水能力[28]，而提高冷却速率可在一定程度上抑制该过程。

T_{2b} 结合水是与蛋白质大分子紧密结合的水分，其占比波动主要受宰后肌肉蛋白构象变化、蛋白-水相互作用双重调控。贮藏初期对照组发生宰后僵直，肌原纤维蛋白构象发生改变，蛋白分子内部极性基团暴露，能够结合更多水分子，因此峰面积占比出现上升；而经过不同速率快速冷却预处理的样品，快速预冷在宰后早期就改变了肌原纤维蛋白的变性程度与构象状态，不同冷却速率对蛋白空间结构的影响程度存在差异，使得各组蛋白暴露、

解离结合位点的时间节点并不同步，因此表现出波动趋势不一致。

同时，对照组与 RP-I组中固定水对应峰面积百分比随贮藏时间呈下降趋势，而 RP-II和 RP-III组变化不显著，说明在未处理或低速冷却条件下，固定水逐渐向自由水转化；而较高冷却速率能够有效抑制这一转化过程。上述结果进一步表明，固定水向自由水的转变是导致水分流失的重要原因，而快速冷却预处理能够延缓该过程，且冷却速率越高，其抑制效果越显著。值得注意的是，结合水对应峰面积百分比在贮藏过程中呈现一定波动，这可能与固定水和自由水变化的协同影响有关。基于上述结果可以认为，快速冷却预处理通过抑制固定水向自由水的转化，从而有效降低鸡胸肉在贮藏过程中的水分流失。

表 1 鸡胸肉在不同冷却预处理和储存时间下的 T_2峰面积百分比

Table 1 Peak area percentage of T_2 of chicken breast at different chilling pre-treatment and storage times

	贮藏时间	峰面积百分比/%			
	/d	对照组	RP-I组	RP-II组	RP-III组
T_{2b}	1	1.40 ± 0.10^{Bb}	1.33 ± 0.21^{Bc}	1.71 ± 0.26^{Ba}	2.76 ± 0.38^{Aa}
	3	3.31 ± 0.06^{Aa}	2.55 ± 0.43^{ABab}	1.57 ± 0.06^{Ba}	1.67 ± 0.62^{Ba}
	5	1.57 ± 0.03^{Ab}	1.91 ± 0.32^{Abc}	1.11 ± 0.09^{Aa}	1.56 ± 0.42^{Aa}
	7	3.20 ± 0.14^{Aa}	3.15 ± 0.15^{Aa}	1.42 ± 0.21^{Ba}	2.03 ± 0.53^{Ba}
T_{22}	1	98.36 ± 0.12^{Aa}	98.48 ± 0.19^{Aa}	98.12 ± 0.26^{Aa}	97.11 ± 0.38^{Ba}
	3	98.05 ± 0.03^{Aa}	97.23 ± 0.42^{Aa}	98.22 ± 0.06^{Aa}	98.08 ± 0.64^{Aa}
	5	96.40 ± 0.06^{Ab}	97.87 ± 0.34^{Aa}	98.65 ± 0.09^{Aa}	98.21 ± 0.39^{Aa}
	7	94.86 ± 0.18^{Cc}	96.01 ± 0.64^{BCb}	98.25 ± 0.22^{Aa}	97.63 ± 0.53^{ABa}
T_{23}	1	0.25 ± 0.02^{Aa}	0.20 ± 0.01^{Ba}	0.18 ± 0.01^{Ba}	0.14 ± 0.01^{Ca}
	3	0.30 ± 0.00^{Aa}	0.23 ± 0.02^{Ba}	0.21 ± 0.01^{Bb}	0.26 ± 0.03^{Bb}
	5	0.38 ± 0.00^{Ab}	0.22 ± 0.02^{Ba}	0.24 ± 0.00^{Bc}	0.24 ± 0.03^{Bb}
	7	0.96 ± 0.04^{Ac}	0.35 ± 0.01^{Bb}	0.33 ± 0.01^{Bd}	0.35 ± 0.01^{Bc}

注：同一时间点上，不同大写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。同一组内，不同小写字母表示不同储存时间之间差异显著（$P<0.05$）。下表同。

为进一步直观表征水分分布状态，通过 MRI 观察不同处理样品中水分子氢质子密度的变化情况（图 4）。图像中由蓝色向红色的变化表示水分含量增加。随着贮藏时间延长，各处理组红色信号逐渐减弱、蓝色信号增强，说明水分流失逐渐加剧。相比之下，快速冷却预处理组，尤其是 RP-III组，表现出更高且更均匀的质子密度分布，表明其能够显著提高鸡胸肉的持水能力并改善水分分布状态[26]。

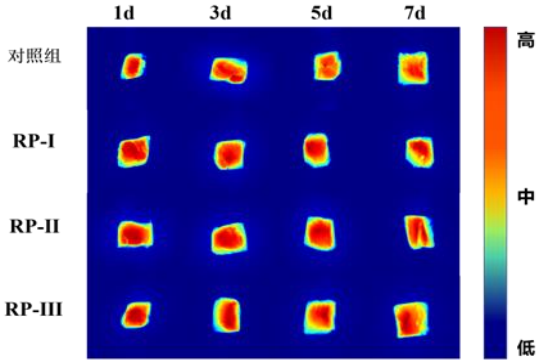


图 4 不同冷藏预处理下鸡胸肉在储存过程中水分子氢质子密度的变化

Fig.4 The changes in the hydrogen proton density of water molecules in chicken breast during storage under different chilling pre-treatments

2.1.3 肌原纤维蛋白降解

与水分分布特征类似，肌原纤维蛋白结构的完整性亦与肉品水分流失密切相关。肌原纤维结构破坏及蛋白质降解被认为是贮藏过程中水分流失的主要原因。为进一步阐明鸡胸肉水分流失与肌原纤维蛋白降解之间的关系，测定了三氯乙酸（Trichloroacetic Acid，TCA）溶解肽含量及 MFI 指数。

TCA 溶解肽水平与内源酶或微生物蛋白酶介导的肌肉蛋白水解程度呈正相关[29]。如图 5a 所示，各处理组 TCA 溶解肽含量均随贮藏时间延长而增加，表明鸡胸肉在宰后贮藏过程中发生了不同程度的肌原纤维蛋白降解[30]。其中，对照组 TCA 溶解肽含量由第 1 d 的 0.56 μmol 显著升高至第 7 d 的 0.73 μmol；而快速冷却预处理组该指标的升幅明显较低，RP-I、RP-II和 RP-III组分别由 0.56 μmol 升至 0.68、0.65 和 0.65 μmol。上述结果表明，快速冷却预处理能够有效延缓蛋白质降解进程，且冷却速率越高，其抑制作用越显著。这可能归因于快速降温对内源酶活性及微生物生长的抑制，从而减缓蛋白质水解[9,31]。

MFI 指数是衡量肌原纤维蛋白降解程度的重要指标，同时可间接反映肉品嫩度变化。如图 5b 所示，在各贮藏时间点，对照组与 RP-III组之间的 MFI 差异均达到显著水平（P<0.05），而对照组与 RP-I组在整个贮藏期间未表现出显著差异；RP-I组仅在贮藏第 3 d 和第 7 d 与对照组存在显著差异（P<0.05）。该结果表明，较高冷却速率对抑制肌原纤维蛋白降解更为有效。综上，RP-III预处理能够较好地维持肌原纤维结构的完整性，进一步验证了快速冷却处理在抑制蛋白质降解方面的有效性，且其效果随冷却速率的提高而增强。

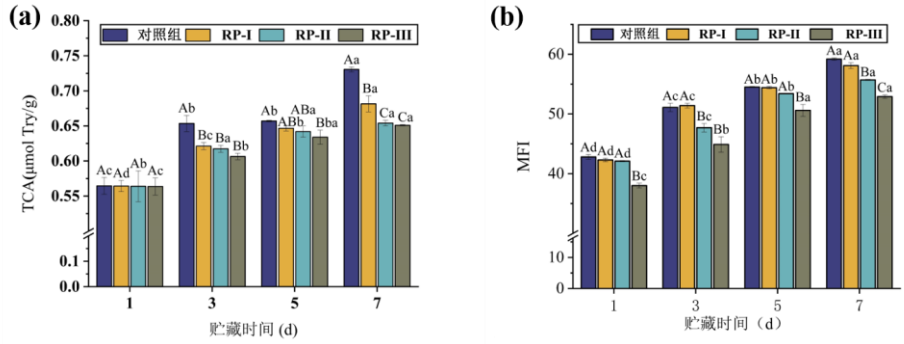


图 5 不同冷却预处理下鸡胸肉在储存过程中的肌原纤维蛋白降解

Fig.5 Myofibrillar protein degradation during storage period under different chilling pre-treatments for chicken breast meat

注:（a）TCA 溶解肽含量的变化;（b）MFI 指数的变化。

2.1.4 鸡胸肉微观结构

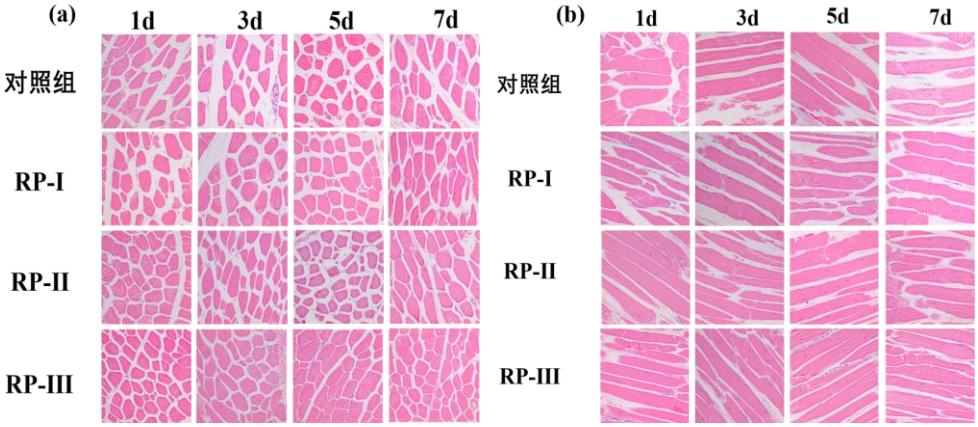


图 6 鸡胸肉在不同冷却预处理下储存期间微观结构的变化（放大倍数：×400）

Fig.6 The changes in the microstructure of chicken breast during storage under different cooling pretreatments (magnification: ×400)

蛋白质降解程度的增加会破坏肌原纤维蛋白结构，进而影响肌纤维的微观组织形态[32]。为直观揭示不同快速冷却预处理对鸡胸肉结构稳定性的影响，采用光学显微镜对样品进行观察，其横截面与纵截面的微观结构分别如图 6a 和图 6b 所示。

在对照组中，随着贮藏时间延长，肌纤维结构逐渐疏松，纤维间隙不断扩大。贮藏至第 3 d 时，已观察到肌纤维断裂及明显的降解现象；至第 7 d，肌原纤维束之间的界限趋于模糊。该微观结构劣变为多因素共同作用的结果，其中宰后冷藏过程中内源蛋白酶介导的肌原纤维蛋白持续降解是肌纤维结构破损、断裂及束间边界模糊的核心诱因。同时，贮藏期间鸡胸肉水分不断流失[33]，造成肌纤维失水收缩、间隙增大，并通过改变肌肉微环境进一

步促进蛋白降解，加速结构劣变进程，与前述持水性变化规律相一致。

相比之下，快速冷却预处理组鸡胸肉的微观结构变化程度明显较小，其细胞外间隙与肌纤维束形态保持相对稳定，肌原纤维束结构完整且界限清晰。尤其在 RP-III处理组中，整个贮藏过程中肌原纤维束边界及纤维间隙均未出现显著变化，表现出较强的结构稳定性。

综上，快速冷却预处理有助于维持鸡胸肉肌纤维的微观结构完整性，从而在 4 ℃贮藏过程中有效抑制水分流失并改善产品品质。

2.2 快速冷却预处理维持新鲜度的作用机制

核苷酸代谢过程对肉品新鲜度及品质保持具有重要影响。屠宰后，肌肉中的 ATP 在 ATP 酶等内源酶作用下逐渐降解为 IMP 及其他代谢产物[6]。其中，IMP 是评价肉品新鲜度的重要指标之一，但其稳定性较差，在贮藏过程中会进一步降解生成具有苦味的 Hx[34]。因此，肉品新鲜度下降通常与 ATP 和 IMP 含量降低及 Hx 积累密切相关。

如表 2 所示，随着贮藏时间延长，各处理组 ATP 和 IMP 含量均显著下降（P<0.05）。宰后肌肉中 IMP 主要由 ATP 依次降解生成 ADP、AMP，再经 AMP 脱氨酶催化脱氨产生。超快速冷却能够快速降低肉品温度，一方面可抑制 AMP 脱氨酶以外的部分降解酶活性，减少 IMP 进一步向 Hx 等产物分解消耗；另一方面，快速预冷可调控宰后早期 ATP 分解代谢进程，有利于推动代谢流向 IMP 生成方向进行，贮藏早期就积累更高水平的 IMP。对照组冷却缓慢，肉品温度下降慢，IMP 生成后又较快被相关酶进一步分解，因此对照组第 1 d IMP 含量低于 RP-Ⅲ处理组。贮藏 7 d 后，对照组 ATP 含量由 254.44 mg/100 g 降至 121.46 mg/100 g，降幅达 52.26%；而 RP-I、RP-II 和 RP-III组分别下降 48.24%、41.86%和 31.11%。类似地，对照组 IMP 含量由 218.13 mg/100 g 降至 151.82 mg/100 g，降幅为 30.40%；RP-I、RP-II和 RP-III组分别下降 32.95%、30.40%和 25.12%。已有研究表明，鸡胸肉鲜味品质下降与贮藏过程中 ATP 和 IMP 含量减少密切相关[35]，而降低贮藏温度能够有效延缓 ATP 降解速率[31]。结果表明，快速冷却预处理可显著减缓 ATP 和 IMP 含量的下降，从而有助于维持鸡胸肉的新鲜度。

在冷藏过程中，IMP 进一步降解生成 Hx，会对肉品感官品质产生不利影响[35]。如表 2 所示，各处理组 Hx 含量均随贮藏时间延长而逐渐升高。贮藏 1 d 时，快速冷却预处理组与对照组之间 Hx 含量无显著差异；但随着贮藏时间延长，快速冷却预处理显著抑制了 Hx 的生成，且在 RP-II和 RP-III组中表现更为明显。贮藏 3 d 后，RP-II和 RP-Ⅲ组鸡胸肉中 Hx 含量分别为 12.91 mg/100 g 和 11.53 mg/100 g。此外，对照组贮藏 3 d 时的 Hx 含量与 RP-III组贮藏 7 d 时无显著差异，说明快速冷却预处理可有效延缓 Hx 积累，延长鸡胸肉的新鲜品质保持时间。这可能与快速冷却抑制了参与核苷酸降解的相关内源酶活性有关。

表 2 不同冷却预处理和储存时间对鸡胸肉的核苷酸代谢产物和 ATP 酶活性的影响

Table 2 Nucleotide metabolites and ATPase activity of chicken breast at different chilling pre-treatment and storage times

	贮藏时间/d	对照组	RP-I	RP-II	RP-III
ATP /(mg/100 g)	1	254.44 ± 1.41^{Aa}	250.71 ± 8.71^{Aa}	254.34 ± 6.24^{Aa}	267.13 ± 3.32^{Aa}
	3	204.88 ± 4.78^{Bb}	208.63 ± 3.95^{Bb}	212.71 ± 4.00^{Bb}	228.07 ± 2.05^{Ab}
	5	140.67 ± 1.34^{Dc}	172.82 ± 1.51^{Cb}	184.94 ± 1.05^{Bc}	208.98 ± 0.78^{Ac}
	7	121.46 ± 3.48^{Cc}	129.77 ± 3.12^{BCc}	147.88 ± 6.18^{Bd}	184.02 ± 8.08^{Ad}
IMP /(mg/100 g)	1	218.13 ± 1.94^{Ba}	245.73 ± 2.17^{Aa}	243.53 ± 4.37^{Aa}	247.53 ± 8.32^{Aa}
	3	203.96 ± 1.37^{Bb}	207.89 ± 0.72^{ABb}	210.47 ± 3.11^{ABb}	214.03 ± 0.27^{Ab}
	5	199.22 ± 1.02^{Cb}	201.33 ± 0.08^{Cc}	208.24 ± 1.55^{Bb}	213.69 ± 1.16^{Ab}
	7	151.82 ± 0.64^{Dc}	164.77 ± 0.40^{Cd}	169.50 ± 0.37^{Bc}	185.34 ± 0.06^{Ac}
Hx /(mg/100 g)	1	13.01 ± 0.02^{Ac}	11.46 ± 0.54^{ABc}	11.83 ± 0.79^{ABc}	10.88 ± 0.09^{Bb}
	3	13.72 ± 0.56^{Abc}	13.01 ± 0.03^{ABb}	12.91 ± 0.07^{ABab}	11.53 ± 0.06^{Bb}
	5	15.02 ± 0.22^{Aab}	15.46 ± 0.03^{ABa}	14.40 ± 0.33^{Bb}	12.15 ± 0.17^{Cab}
	7	16.46 ± 0.61^{Aa}	16.13 ± 0.37^{Aa}	16.97 ± 0.01^{Aa}	13.42 ± 0.41^{Ba}
ATPase /(U·g^{-1})	1	848.46 ± 2.45^{Aa}	791.85 ± 2.58^{Ba}	731.74 ± 9.37^{Ca}	656.85 ± 2.19^{Da}
	3	759.91 ± 3.51^{Ab}	708.27 ± 8.03^{Bb}	681.56 ± 8.53^{Cb}	639.26 ± 2.26^{Da}

5	736.78±1.93^{Ac}	647.46±10.99^{Bc}	576.28±6.78^{Cc}	567.06±11.01^{Cb}
7	675.79±10.41^{Ad}	559.07±6.89^{Bd}	536.75±3.99^{Bd}	424.15±11.89^{Cc}

2.3 嫩度和新鲜度

剪切力是反映肉品嫩度的重要指标，对产品品质及消费者接受度具有重要影响。不同冷却处理对鸡胸肉剪切力的影响如图 7a 所示。在贮藏 7 d 过程中，各处理组剪切力均呈下降趋势，对照组、RP-I、RP-II和 RP-III组分别由 19.8、20.1、20.3 和 21.0 N 降至 16.3、16.4、16.8 和 17.5 N。即随着贮藏时间延长，鸡胸肉剪切力逐渐降低，这主要归因于宰后成熟过程中肌原纤维蛋白的降解[36,37]。

然而，与对照组相比，快速冷却预处理组在各贮藏阶段均表现出更高的剪切力，且随着冷却速率的提高呈现递增趋势。研究表明，肉品嫩度主要受肌原纤维蛋白降解程度影响，而该过程受内源酶活性及微生物作用调控[36]。因此，快速冷却预处理导致剪切力升高，可能是由于低温环境抑制了内源蛋白酶活性及微生物生长，从而延缓蛋白质降解进程[31]。此外，RP-III组贮藏 3 d 时的剪切力与对照组贮藏 1 d 时相当，表明相较于未处理样品，快速冷却有助于延缓品质变化。

TVB-N 主要来源于蛋白质分解过程中产生的氨及胺类等碱性含氮化合物[38]，是评价肉品新鲜度的重要指标，其数值越高表明不新鲜程度越高[36]。根据我国食品安全国家标准 GB/T 5009.228-2016，鲜肉 TVB-N 限量为 15 mg/100 g。鸡胸肉在 4 ℃贮藏 7 d 过程中 TVB-N 的变化如图 7b 所示。贮藏 5 d 后，对照组、RP-I、RP-II和 RP-III组 TVB-N 值分别为 15.4、13.9、12.4 和 11.9 mg/100 g。依据该标准，对照组在贮藏 5 d 后已发生腐败，RP-I组在贮藏 7 d 后达到腐败临界，而 RP-II和 RP-III组在贮藏 7 d 后仍处于可接受范围，其 TVB-N 值分别为 14.4 和 14.2 mg/100 g。

综上，快速冷却预处理能够显著延缓鸡胸肉在 4 ℃贮藏过程中的品质劣变与腐败进程，从而提高其贮藏稳定性并延长货架期。

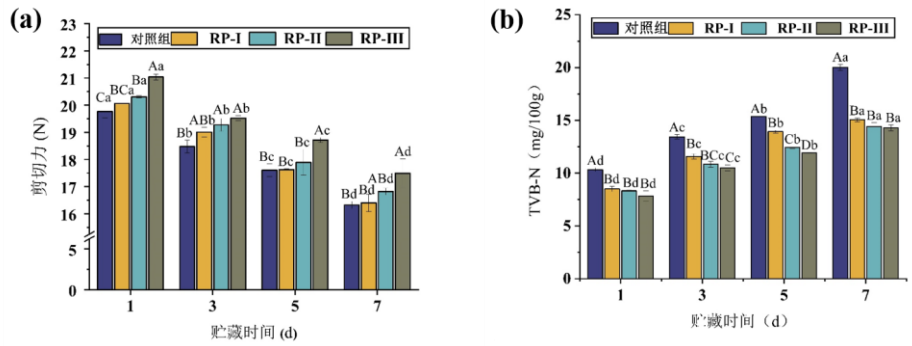


图 7 不同冷却预处理下对鸡胸肉在储存过程中品质的影响

Fig.7 The effect of different chilling pre-treatments on the quality of chicken breast during storage

注:（a）剪切力的变化;（b）TVB-N 含量的变化。

3 结论

本研究以传统 4 ℃冰箱冷却作为对照组，不同快速冷却速率为实验组，对鸡胸肉在 4 ℃贮藏期间的水分流失、水分分布、蛋白质降解和鲜度进行评估。发现快速冷却预处理通过抑制肌原纤维蛋白降解及 ATP 酶等内源酶活性，有效降低了鸡胸肉在 4 ℃贮藏过程中的水分流失，并延缓其新鲜度劣变。同时，该处理对鸡胸肉品质具有显著改善作用，具体表现为冷藏过程中剪切力下降速率减缓，以及 TVB-N 含量的升高受到抑制，从而有助于维持产品的嫩度与整体品质。

参考文献

[1] CAO C, XIAO Z, GE C, et al. Application and research progress of proteomics in chicken meat quality and identification: a review [J]. Food Reviews International, 2020, 38(3): 1-22.

[2] WANG H, QIN Y, LI J, et al. Edible quality of soft-boiled chicken processing with chilled carcass was better than that of hot-fresh carcass [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(2): 797-804.

[3] CAO C, XIAO Z, TONG H, et al. Effect of ultrasound-assisted enzyme treatment on the quality of chicken breast meat [J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 125: 193-203.

[4] SARA S L, FATEMEH M, SAEID K, et al. Effect of alginate coating activated by solid lipid nanoparticles containing Zataria multiflora essential oil on chicken fillet's preservation [J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138816.

[5] TRACY L S, DAVID E G.Mechanisms controlling pork quality development: The biochemistry controlling postmortem energy metabolism [J]. Meat Science, 2007, 77(1): 7-16.

[6] SURINDER S C, ERIC M E. Postmortem glycolysis and glycogenolysis: insights from species comparisons [J]. Meat Science, 2018, 144: 118-126.

[7] YU Q, BRUCE C, TIAGO S, et al. Utilizing pork exudate metabolomics to reveal the impact of aging on meat quality [J]. Foods, 2021, 10(3): 668.

[8] YAN T, HOU C, WANG Z, et al. Effects of chilling rate on progression of rigor mortis in postmortem lamb meat [J]. Food Chemistry, 2022, 373(PB): 131463.

[9] YAN T, HOU C, WANG Z, et al. Effects of chilling rate on the freshness and microbial community composition of lamb carcasses [J]. Lwt, 2022, 153: 112559.

[10] TIM B, TAN R, CAROL W, et al. Vascular perfusion chilling of red meat carcasses-A feasibility study [J]. Meat Science, 2009, 83(4): 666-671.

[11] FEMANDEZ A M, VIEIRA C. Effect of chilling applied to suckling lamb carcasses on hygienic, physicochemical and sensory meat quality [J]. Meat Science, 2012, 92(4): 569-574.

[12] RINWI T G, MA J, SUN D, et al. Underlying mechanisms and molecular interactions of isochoric freezing on enhancing the freshness of chicken breast meat [J]. LWT - Food Science and Technology, 2023, 187: 115035.

[13] XU Y, XIE F, HOU C, et al. Effects of different electrostatic field intensities assisted controlled freezing point storage on water holding capacity of fresh meat during the early postmortem period [J]. Food Chemistry, 2023, 439: 138096.

[14] LIU L, JIAO W, XU H, et al. Effect of rapid freezing technology on quality changes of freshwater fish during frozen storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2023, 189: 115520.

[15] LI P, SUN L, WANG J, et al. Effects of combined ultrasound and low-temperature short-time heating pretreatment on proteases inactivation and textural quality of meat of yellow-feathered chickens [J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129645.

[16] ZOU Y, KANG D, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef [J]. Ultrasonics - Sonochemistry, 2018, 46: 36-45.

[17] LIU H, PAN T, WANG Z, et al. Effects of roasting by charcoal, electric, microwave and superheated steam methods on (non)volatile compounds in oyster cuts of roasted lamb [J]. Meat Science, 2021, 172: 108324.

[18] WU G, YANG C, HEATHER L B, et al. Effects of alternating electric field during freezing and thawing on beef quality [J]. Food Chemistry, 2023, 419: 135987.

[19] DONG H P, SANG Y L, EUN J K, et al. Freshness of deep frozen mackerel and croaker during long-term storage [J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1): 89-104.

[20] BRIAN C B, HONG Z. Relationship between muscle exudate protein composition and broiler breast meat quality [J]. Poultry Science, 2013, 92(5): 1385-1392.

[21] KIM G D, JUNG E Y, LIM H J, et al. Influence of meat exudates on the quality characteristics of fresh and freeze-thawed pork [J]. Meat Science, 2013, 95(2): 323-329.

[22] ROLDAN M, ANTEQUERA T, PEREZ P, et al. Effect of added phosphate and type of cooking method on physico-chemical and sensory features of cooked lamb loins [J]. Meat Science, 2014, 97(1): 69-75.

[23] HAYAT M H, FITRY M, KAKA U, et al. Assessing meat quality and textural properties of broiler chickens: the impact of voltage and frequency in reversible electrical water-bath stunning [J]. Poultry Science, 2024, 103(7): 103764.

[24] BARBUT S. Measuring water holding capacity in poultry meat [J]. Poultry Science, 2024, 103(5): 103577.

[25] NARA R B, ANA P M, et al. Assessment of water relaxometry of meat under different ageing processes using time domain nuclear magnetic resonance relaxometry [J]. Food Research International, 2024, 190: 114566.

[26] LIU J, YUE H, FENG Y, et al. Myofibrillar proteins' intermolecular interaction weakening and degradation: Are they mainly responsible for the tenderization of meat containing l-arginine, l-lysine, or/and NaCl? [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138318.

[27] AMMAR K M, BAILA A, ASGHAR A K, et al. Use of NMR relaxometry for determination of meat properties: a brief review [J]. Food Materials Research, 2022, 2(1): 1-8.

[28] SHAO J, DENG Y, JIA N, et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition [J]. Food Chemistry, 2016, 200: 308-314.

[29] YI Z, XIE J. Assessment of spoilage potential and amino acids deamination & decarboxylation activities of Shewanella putrefaciens in bigeye tuna (Thunnus obesus) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 156: 113016.

[30] YANG Z, YZN J, WANG Y, et al. Changes in the physicochemical properties of grouper (Epinephelus coioides) fillets stored under vacuum packaging at chilly temperature contributing with the spoilage bacteria [J]. Food Bioscience, 2023, 55: 101037.

[31] BAI Y, REN C, HOU C, et al. Phosphorylation and acetylation responses of glycolytic enzymes in meat to different chilling rates [J]. Food Chemistry, 2023, 421: 135896.

[32] GE L, XU Y, XIA W. The function of endogenous cathepsin in quality deterioration of grass carp (Ctenopharyngodon idella) fillets stored in chilling conditions [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50(3): 797-803.

[33] LARA M, MARILISA A, GIOVANNI C, et al. Optimizing radiofrequency assisted cryogenic freezing to improve meat microstructure and quality [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 335: 111184.

[34] HUANG Z,ZHANG J, GU Y, et al. Integrating proteomics and metabolomics to elucidate the molecular network regulating of inosine monophosphate-specific deposition in Jingyuan chicken [J]. Poultry Science, 2023, 102(12): 103118.

[35] WILLIAMSON J, RYLAND D, SUH M, et al. The effect of chilled conditioning at 4 ℃ on selected water and lipid-soluble flavor precursors in Bison bison longissimus dorsi muscle and their impact on sensory characteristics [J]. Meat Science, 2014, 96(1): 136-146.

[36] CHO S, KIM H, SEOL K. Relation among quality traits of chicken breast meat during cold storage: correlations between freshness traits and torrymeter values [J]. Poultry Science, 2018, 97(8): 2887-2894.

[37] VAN B, OLIVEROS C, PARK K, et al. Effect of marbling and chilled ageing on meat-quality traits, volatile compounds and sensory characteristics of beef longissimus dorsi muscle [J]. Animal Production Science, 2017, 57(5): 981-992.

[38] QIAO L,TANG X, DONG J. A feasibility quantification study of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in duck meat for freshness evaluation [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 1179-1185.