

高湿度结合不同温度解冻对猪肉理化及蛋白特性的影响

朱明明^{1,2,3}, 彭泽宇¹, 鲁森¹, 马长明⁴, 何鸿举¹, 王正荣¹, 马汉军¹, 康壮丽¹, 赵圣明¹

(1.河南科技学院食品学院, 河南 新乡 453003; 2.河南科技学院 畜禽产品精深加工与质量安全控制河南省工程技术研究中心, 河南 新乡 453003; 3.国家猪肉加工技术研发专业中心, 河南 新乡 453003; 4.河南省商业科学研究所有限责任公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 探究相对湿度 (relative humidity, RH) 90%下, 不同温度 (0、4、8 °C和12 °C) 解冻对猪肉品质特性的影响, 以鲜肉和传统低温 (4 °C, RH 65%~73%) 解冻肉为对照, 分析处理组和对照组的解冻效率、保水性、嫩度、色泽、脂质过氧化、pH值、新鲜度的变化, 并利用差示扫描量热仪和流变仪测定蛋白热变性及其动态流变特性。结果表明: 相较于传统低温解冻, 高湿 (RH 90%)、低温 (0~12 °C) 解冻可提高解冻效率, 且解冻后猪肉的保水性、色泽、嫩度显著提高 ($P < 0.05$), 明显抑制脂肪氧化程度, 降低蛋白变性程度, 可最大限度维持“鲜肉”的品质; 其中, 高湿环境下4 °C和8 °C解冻效果明显优于0、12 °C处理组, 解冻后猪肉的保水性、色泽、嫩度得到改善, 脂肪氧化程度降低, 同时4 °C和8 °C解冻后猪肉蛋白变性程度较低, G' 较高。因此RH 90%、4~8 °C解冻是较合适的解冻条件, 该条件可提高解冻效率、维持猪肉品质。

关键词: 高湿度解冻; 温度; 猪肉; 理化指标; 蛋白特性

Effect of High-Humidity Thawing under Different Temperatures on Physicochemical Characteristics and Protein Properties of Frozen Pork

ZHU Mingming^{1,2,3}, PENG Zeyu¹, LU Sen¹, MA Changming⁴, HE Hongju¹, WANG Zhengrong¹, MA Hanjun¹, KANG Zhuangli¹, ZHAO Shengming¹

(1. School of Food Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 2. Henan Province Engineering Technology Research Center of Animal Products Intensive Processing and Quality Safety Control, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 3. National Pork Processing Technology Research and Development Professional Center, Xinxiang 453003, China; 4. Henan Business Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450002, China)

Abstract: This study was conducted to analyze the effect of different thawing temperatures (0, 4, 8 and 12 °C) under high relative humidity (RH 90%) on the quality characteristics of frozen pork. Fresh pork and conventional low temperature thawing (4 °C, RH 65%–73%) were considered as control. Thawing rate as well as physicochemical characteristics including water-holding capacity (WHC), tenderness, color, lipid oxidation (2-thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) content), pH and freshness were measured and compared among various groups. Protein thermal denaturation and rheological properties were examined as well by a differential scanning calorimeter (DSC) and a rheometer, respectively. The results showed that compared with the conventional low temperature thawing, high-humidity low-temperature thawing could improve the thawing efficiency. The WHC, color and tenderness were improved and lipid oxidation was inhibited significantly ($P < 0.05$). Also, protein denaturation was reduced. As a result, high-humidity low-temperature thawing provided the best maintenance of fresh pork quality, and thawing at 4 and 8 °C was significantly better than at 0 and 12 °C as evidenced by improved WHC, color and tenderness, reduced lipid oxidation, lower degree of protein denaturation, and higher storage modulus G' . Therefore, thawing at 90% humidity and 4–8 °C could enhance the thawing efficiency, and maintain pork quality and could be more suitable for frozen pork.

Keywords: high-humidity thawing; temperature; pork; physicochemical indicators; protein properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180925-259

收稿日期: 2018-09-25

基金项目: 河南省重大科技专项 (161100110600); 河南科技学院高层次人才科研项目 (2016020);

河南省科技厅科技攻关项目 (182102110404; 192102110108)

第一作者简介: 朱明明 (1989—) (ORCID: 0000-0002-8097-6892), 女, 讲师, 博士, 主要从事食品分析研究。

E-mail: happyzhumingming@126.com

中图分类号: TS251.44

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 17-0127-07

引文格式:

朱明明, 彭泽宇, 鲁森, 等. 高湿度结合不同温度解冻对猪肉理化及蛋白特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 127-133. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180925-259. <http://www.spkx.net.cn>

ZHU Mingming, PENG Zeyu, LU Sen, et al. Effect of high-humidity thawing under different temperatures on physicochemical characteristics and protein properties of frozen pork[J]. Food Science, 2019, 40(17): 127-133. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180925-259. <http://www.spkx.net.cn>

我国是猪肉第一生产大国, 也是主要消费国家^[1]。由于猪肉及猪肉制品含有丰富的营养物质, 尤其是蛋白质, 且含水量较高; 因此在贮藏、加工及运输的过程中极易滋生腐败微生物, 造成经济损失和环境污染, 甚至危及人类健康^[2]。目前, 为了确保肉制品的安全食用性和经济性, 冷冻贮藏仍是加工行业常用的成本较低的保鲜手段^[3]。随着肉类消费快速发展, 大众对于肉类的生产、运输及解冻处理等方面提出了更高的要求, 因而研究解冻方法对冻结猪肉的影响至关重要, 以便能够稳定地获得高品质的原料肉。

肉及肉制品的保水性(汁液损失、离心损失、滴水损失及蒸煮损失等)对肉制品的品质有很大影响^[4]。而在解冻过程中, 汁液损失是最常出现的问题之一, 受到很多客观因素如蛋白质、pH值、色泽、脂肪、新鲜度的影响, 一般不可避免, 但合适的解冻方法可大幅降低该损失^[5]。冷冻肉的解冻一般采用空气、静水、低温(4℃冰箱)解冻等^[6-7], 也有一些热门新型的解冻方式, 如微波、超声波、欧姆及高压静电场解冻^[8-10]。各种解冻方法都有其优缺点。传统解冻耗时、效率低, 且易造成肉类污染, 从而影响肉品品质^[11]; 而新型解冻方式虽然在一定程度上克服了这些缺点, 但由于所用设备自身的局限性, 仍会造成品质劣变而阻碍其发展应用^[12-13]。

随着技术水平的发展, 低温高湿解冻逐步应用到肉类工业中, 该方法改善了传统低温解冻时间长, 汁液流失严重, 蛋白、脂肪氧化劣变的缺点, 又保留了微生物污染低、肉品品质损失低等优点^[14]。张春晖^[15]、Li Yin^[16]等研究低温高湿变温解冻对牛羊肉品质的影响, 结果表明高湿低温变温解冻处理对牛羊肉品质影响最小。张昕等^[17]的研究结果表明4℃、相对湿度(relative humidity, RH)90%环境下解冻后, 鸡胸肉品质最佳。然而目前国内外对于低温高湿解冻对猪肉品质特性研究较少, 本课题组在前期研究中发现温度恒定时, RH 90%解冻可有效提高解冻效率, 降低汁液损失, 改善猪肉品质, 缓解蛋白变性。但是鲜见高湿条件(RH 90%以上)下有关猪肉解冻最适温度的研究。因此, 本实验以鲜肉和传统低温(4℃、

RH 65%~73%)解冻作为对照, 致力于高湿环境中(RH 90%)猪肉解冻温度参数的筛选, 分析其对冷冻猪肉保水性、嫩度、新鲜度、蛋白变性程度、脂肪氧化程度的影响, 同时利用差示扫描量热(differential scanning calorimeter, DSC)仪检测蛋白质的热稳定性, 并利用流变仪评价蛋白的凝胶特性, 以期寻求最佳解冻条件, 获得效率高、耗能低、效果好的解冻技术, 从而为猪肉企业提供合理高效的技术参数, 提高企业经济效益。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

选取5头体质量基本一致((100±5)kg)的内三元杂交猪(品种: 杜洛克×长白×大白), 经待宰、喷淋、麻电、刺杀、脱毛、刮毛、开膛去内脏、割头蹄尾、劈半和成熟等步骤后, 取猪背最长肌(平均质量(2.9±0.1)kg)用于后续实验。实验猪屠宰与现场取样地点为河南新乡高金食品有限公司。

NA培养基 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司; 其他试剂均购自西陇化工股份有限公司。

1.2 仪器与设备

CTHI-150B恒温恒湿箱 上海施都凯仪器设备有限公司; BC/BD-100HT冷冻室 青岛澳柯玛股份有限公司; CR-400色差计 日本美能达公司; L93-3温度自动记录仪 杭州路格科技有限公司; 差示扫描量热仪 德国耐驰公司; MCR301流变仪奥地利Anton Paar公司; YXQ-LS-50S全自动立式压力蒸汽灭菌锅 上海博迅医疗设备有限公司医疗设备厂; T25高速匀浆器 德国IKA公司; 106插入式温度计德国德图公司; pH计 上海精密科学仪器有限公司; 电导率仪 梅特勒-托利多(上海)仪器有限公司; C-LM4型数显式肌肉嫩度仪 东北农业大学工程学院。

1.3 方法

1.3.1 原料处理

将背最长肌样品运回实验室后, 在无菌条件下将表面脂肪及结缔组织剔除, 并将原料肉分割成规则的肉块(质量为(150±0.5)g; 尺寸为6 cm×5 cm×3.5 cm),

采用自封袋(120 mm×170 mm)分装,随机分成6组,每组5份。任意挑选一组作鲜肉对照组,直接进行肉质形状指标的测定。其他各组包装后-18℃冻藏24 h后,其中一组采用4℃冰箱解冻(RH 65%~73%)(传统低温对照组),其余4组放置于CTHI-150B恒温恒湿箱中在高湿条件下(RH 90%,直接调节湿度按钮控制湿度),采用不同温度(0、4、8、12℃,直接调节温度按钮控制温度)解冻至中心温度达到2℃,测定解冻后肉样的各项指标。

1.3.2 解冻时间的测定

参照余小领等^[18]的方法测定解冻时间并略作修改。解冻开始之前,用钉子在冷冻肉样品距离中心位置最近的一面取一孔道,方便温度计插入样品的中心位置。在解冻过程中,测量样品中心温度的变化情况(-18~2℃)。

1.3.3 保水性的测定

解冻猪肉的保水性主要通过汁液损失率、滴水损失率和蒸煮损失率来衡量。汁液损失率参考余小领等^[18]的方法测定;蒸煮损失率参考Xia Xiufang等^[8]的方法测定;滴水损失率根据Adeyemi等^[19]的方法测定。

1.3.4 剪切力的测定

参考Baublits等^[20]的方法,利用测定蒸煮损失后的样品进行剪切力的测定。将蒸煮损失后的肉样分割成1 cm×1 cm×2 cm的立方体,用肌肉嫩度仪沿着肌纤维垂直方向剪切肉样,记录剪切力/N。

1.3.5 色泽的测定

参考Chang Haijun等^[21]的方法测定色泽。使用CR-400色差计测定鲜肉和解冻肉样表面的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。测定前对色差计进行校准,白板 L^* 、 a^* 、 b^* 值分别为97.22、-0.14、1.82。需对每个样品的5个位点进行检测,并加以标记,尽量使得样品之间测定位点一致,减小误差。取5个位点的平均值作为该肉样的色泽值。

1.3.6 TBARS值的测定

硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive species, TBARS)值的测定参考He Xiangli等^[22]的方法,利用硫代巴比妥酸法进行评价。

1.3.7 pH值的测定

参考GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品pH值的测定》^[23]的方法。检测前,按照仪器使用说明,利用pH 6.8和4.0的缓冲液校准pH计。取(5.0±0.1)g鲜肉或解冻肉样,加入45 mL蒸馏水,7 500 r/min下均质15 s后,利用pH计测定其pH值。

1.3.8 新鲜度的测定

猪肉新鲜度由于直接关系着消费者的食用安全性而成为购买时最为重要的评价指标之一。本实验主要检测了样品的挥发性盐基氮(volatile base nitrogen, TVB-N)

含量、电导率和细菌菌落总数,通过三者综合评价新鲜度。TVB-N含量参考GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》中的半微量定氮法测定^[24];电导率的测定参考杨秀娟等^[25]的方法,利用电导率仪测定肉样的电导率;菌落总数参考GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》^[26]测定。

1.3.9 蛋白质变性程度的测定

参考He Xiangli等^[22]的方法,并略作修改。采用水和钢校准温度和热焓。准确称取15~20 mg鲜肉样或解冻肉样,放入样品盘中,升温速率5℃/min,分析温度范围25~100℃,以空样品盘(即不加肉样)作为对照。计算热焓 ΔH (J/g)和相关蛋白的变性温度 T_m /℃。

1.3.10 动态流变特性的测定

利用流变仪测定样品的热动态流变性。将鲜肉或解冻肉样打碎后,均匀涂抹在两个50 mm不锈钢圆形平板之间,间隙为0.5 mm,外周涂一层薄硅油以防止水分蒸发。测定方法:起始温度20℃,保温10 min,以2℃/min的升温速率加热至80℃。升温过程中,在一个振荡模式下,以0.1 Hz的固定频率对样品进行连续剪切,测定储能模量(G')随温度的变化情况^[27]。

1.4 数据处理与分析

所有处理重复5次,使用SPSS 18.0软件进行数据的统计分析,并应用单因素方差分析对实验数据进行差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 高湿不同温度下的解冻曲线

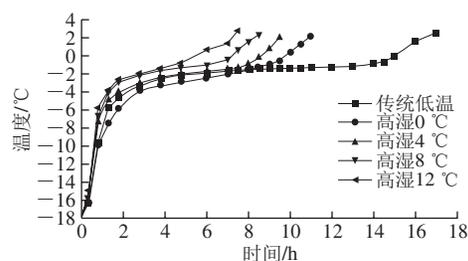


图1 高湿不同温度解冻条件下冷冻肉样中心温度的变化曲线

Fig. 1 Changes in central temperature in frozen pork samples during high humidity thawing with different temperatures

在高湿环境(RH 90%)中,以不同温度条件分别对冷冻猪肉进行解冻,其解冻曲线如图1所示。在所有的解冻过程中,从-5℃升温至-1℃(最大冰晶形成区域)所需时间最长,这与食品冻结过程^[5]一致。传统低温解冻组猪肉中心温度达到2℃需17 h,而高湿解冻(温度0~12℃)所需时间为7.5~11.0 h,明显缩短了解冻时

间, 提高了解冻效率。在高湿环境下, 随着解冻温度的升高, 解冻时间缩短, 解冻效率逐步提高, 这主要是由于温度的升高有利于解冻过程的加速。

2.2 高湿不同温度下解冻对猪肉保水性、嫩度的影响

表1 高湿不同温度下解冻对猪肉保水性和剪切力的影响

Table 1 Effect of different thawing temperatures with high humidity on WHC and shear force of pork

指标	对照		RH 90%高湿环境			
	鲜肉	传统低温	0 °C	4 °C	8 °C	12 °C
汁液损失率/%	6.51±0.21 ^a	4.16±0.16 ^b	2.64±0.14 ^c	2.45±0.10 ^c	2.52±0.23 ^c	2.52±0.23 ^c
滴水损失率/%	4.39±0.24 ^b	5.89±0.08 ^d	4.79±0.15 ^b	4.62±0.15 ^b	4.71±0.17 ^b	4.57±0.16 ^b
蒸煮损失率/%	16.77±0.62 ^e	24.77±0.57 ^f	17.39±0.41 ^{bc}	17.20±0.62 ^{bc}	18.14±0.45 ^{bc}	18.57±0.37 ^b
剪切力/N	43.45±0.42 ^d	56.32±1.91 ^a	52.86±0.85 ^b	46.68±0.67 ^c	48.35±0.77 ^c	47.63±0.73 ^c

注: 同行肩标字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。表2同。

在冻结和解冻过程中, 由于冰晶形成造成的机械损伤和解冻处理后造成的蛋白氧化变性、肌束空隙变大、肌肉蛋白结构改变等, 极易造成肉样保水性变差, 因此猪肉保水性是评价解冻方式好坏的重要指标^[15,28-29]。如表1所示, 经传统低温解冻后, 样品的汁液损失率、滴水损失率和蒸煮损失率分别为6.51%、5.89%、24.77%, 均显著高于所有高湿环境解冻组 ($P < 0.05$), 分析原因可能是高湿环境可有效保护样品蛋白水合面, 抑制表面水分蒸发, 减少干耗^[15]。另外高湿解冻时间短, 可降低低温解冻造成的水分流失。而高湿环境下, 0 °C解冻后肉样汁液损失率(4.16%)显著高于其他温度解冻组 ($P < 0.05$), 这是由于温度较低时, 解冻效率低、时间长, 导致汁液损失较为严重^[30]。不同温度解冻后肉样的滴水损失率和蒸煮损失率无显著差异 ($P > 0.05$), 并与鲜肉较为接近, 表明高湿环境下, 一定范围内的温度差异对滴水损失率和蒸煮损失率无较大影响。

猪肉剪切力的大小与猪肉嫩度呈负相关, 剪切力越大表明嫩度越差。高湿不同温度下解冻后肉样的剪切力如表1所示。经不同解冻方式处理后肉样的剪切力均显著高于鲜肉(43.45 N) ($P < 0.05$), 可能是冻结过程中样品产生的冰晶致使其可塑性降低而造成的^[29]。然而, 高湿解冻后猪肉的剪切力显著低于传统低温处理 ($P < 0.05$), 可能是由于高湿环境有利于减少汁液损失, 从而维持猪肉的嫩度。其中高湿环境下, 0 °C解冻后肉样的剪切力较大, 而4、8、12 °C解冻后肉样剪切力差异不显著 ($P > 0.05$), 这与汁液损失结果一致, 表明汁液损失对猪肉嫩度有较大影响。

2.3 高湿不同温度下解冻对猪肉色泽、TBARS值的影响

色泽是猪肉品质优劣最直观的表现, 影响着消费者的购买欲。由表2可知, 经高湿低温解冻后, 肉样的 L^* 值和 a^* 值显著高于传统低温解冻, 而 b^* 值显著低于传统低温解冻 ($P < 0.05$), 同时三者数值与鲜肉接近 ($P > 0.05$), 表明高湿低温解冻能有效缓解猪肉色泽的劣变, 这可能

是由于高湿环境下, 保水性增强, 使其保有鲜肉色泽^[31]。邸静等^[32]研究发现高湿低温可显著提高牛肉的亮度, 张昕等^[17]研究表明高湿低温也可提高鸡肉的 L^* 值和 a^* 值, 与本实验结果一致。在高湿条件下, 不同温度处理后猪肉的 L^* 值无显著差异 ($P > 0.05$), 但 a^* 值和 b^* 值均有变化。其中0~8 °C处理后, a^* 值和 b^* 值无显著性差异, 随着温度继续升高, 达到12 °C时 a^* 值和 b^* 值显著低于4 °C解冻组, 表明高湿环境下, 0~8 °C解冻可有效保持猪肉色泽。已有研究发现解冻肉样色泽的变化与蛋白及脂质氧化息息相关^[33], 红度下降的原因可能是温度过高, 加速了肌红蛋白氧化生成高铁肌红蛋白^[31]; 也有报道称褐色素中的游离氨基酸可与脂肪氧化形成的自由基反应, 从而加速褐色素形成, 也会促使红度下降^[34]。而黄度升高可能是解冻过程中猪肉脂肪水解后的脂肪酸被氧化造成的^[33]。

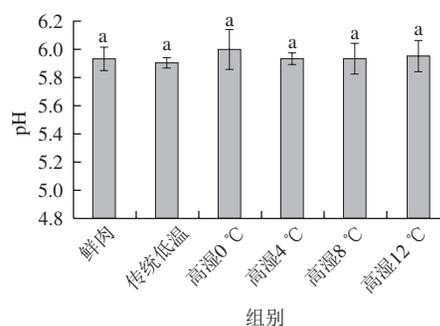
表2 高湿不同温度下解冻对猪肉色泽和TBARS值的影响

Table 2 Effect of different thawing temperatures with high humidity on color and TBARS value of pork

指标	对照		RH 90%高湿环境			
	鲜肉	传统低温	0 °C	4 °C	8 °C	12 °C
L^*	48.64±0.68 ^a	45.96±0.10 ^b	48.87±0.37 ^a	48.70±0.62 ^a	48.28±0.41 ^a	48.37±1.17 ^a
a^*	6.71±0.12 ^{ab}	6.12±0.08 ^c	6.82±0.06 ^a	6.80±0.09 ^a	6.65±0.06 ^{ab}	6.50±0.06 ^b
b^*	5.42±0.13 ^c	6.47±0.13 ^a	5.68±0.17 ^{bc}	5.45±0.13 ^c	5.59±0.11 ^{bc}	5.88±0.09 ^b
TBARS值/(mg/kg)	0.13±0.02 ^{bc}	0.22±0.02 ^a	0.16±0.01 ^{bc}	0.12±0.01 ^c	0.14±0.01 ^{bc}	0.17±0.01 ^b

TBARS值代表脂肪氧化程度的强弱。如表2所示, 高湿低温解冻后猪肉的TBARS值显著低于传统低温解冻组 ($P < 0.05$), 而与鲜肉无显著差异 ($P > 0.05$), 表明高湿低温可有效抑制脂肪的氧化。在高湿环境中, 温度达到12 °C时, 猪肉的TBARS值显著高于4 °C处理, 可能是低温环境抑制脂肪氧化反应的进行, 而随着温度继续升高, 促使脂肪氧化加剧引起的^[29], 这与色泽的结果相一致。

2.4 高湿不同温度下解冻对猪肉pH值的影响



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图2 高湿不同温度解冻对猪肉pH值的影响

Fig. 2 Effect of different thawing temperatures with high humidity on pH of pork

pH值的变化能带来蛋白质分子间的静电荷效应, 从而影响猪肉保水性^[35]。如图2所示, 各温度条件下解冻,

肉样的pH值变化显著,均维持在5.90~5.99之间,且与鲜肉及传统低温解冻相比无显著性差异($P>0.05$),表明高湿环境下不同温度处理(0~12℃)对解冻后肉样的pH值无显著影响,均属于一级鲜肉范畴^[36]。

2.5 高湿不同温度解冻对猪肉新鲜度的影响

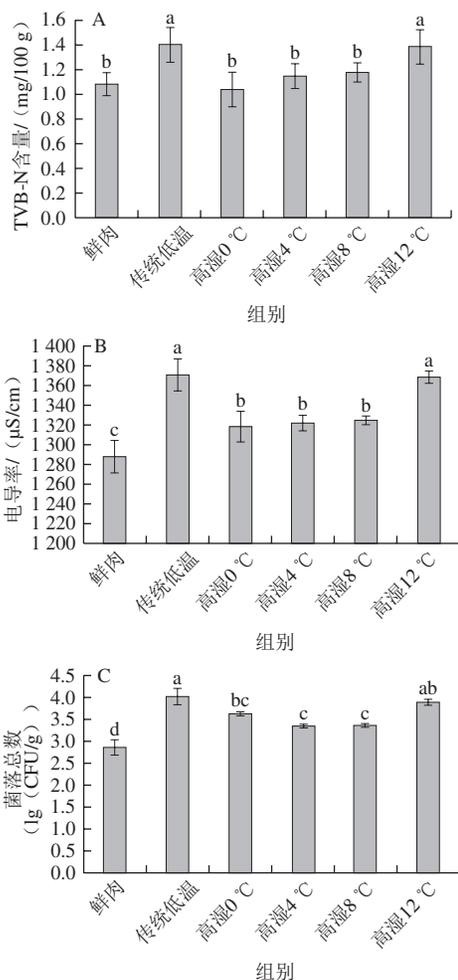


图3 高湿不同温度解冻对猪肉TVB-N含量(A),电导率(B)和菌落总数(C)的影响

Fig. 3 Effect of different thawing temperatures with high humidity on TVB-N content (A), electrical conductivity (B) and total bacterial count (C) of pork

TVB-N含量反映了肉及肉制品因自身代谢及微生物污染而造成的蛋白分解程度,表征猪肉的新鲜度^[29]。如图3A所示,高湿环境下,0、4℃和8℃处理后解冻肉样的TVB-N含量较低,与鲜肉无显著性差异($P>0.05$),低于15 mg/100 g,属一级鲜肉^[36]。而随着温度的继续升高,TVB-N含量显著升高,与传统低温解冻组无显著差异($P>0.05$),预示着腐败程度增加,可能是在高湿环境下,随着温度的升高,肉制品自身代谢活动增强、腐败菌滋生造成的;在传统低温条件下,解冻时间过长会导致蛋白降解、微生物污染^[31]。

随着猪肉新鲜度的下降,其自身成分会发生变化,反应产物中出现大量导电性物质,导致电导率升高,因此电导率也成为检验猪肉新鲜度的重要指标^[25]。由图3B可知,经不同解冻处理后,猪肉的电导率均显著高于鲜肉($P<0.05$),但都在1370 μS/cm以下,属于一级鲜肉^[25]。其中高湿环境下,12℃解冻后肉样的电导率较大,显著高于0、4、8℃解冻后肉样的电导率($P<0.05$),表明温度对猪肉电导率有较大影响。杨秀娟等^[25]研究发现随着猪肉腐败变质,电导率逐渐增加,TVB-N含量也逐渐增加,这与本实验结果一致。

解冻温度升高和解冻时间延长容易造成微生物污染,促使猪肉成分和感官特性发生变化,导致有毒有害物质产生。如图3C所示,在高湿条件下,温度达到12℃时菌落总数(3.88 lg(CFU/g))显著高于4℃和8℃处理后的肉样($P<0.05$),与传统低温解冻组无显著差异($P>0.05$),分析可能是随着解冻环境温度升高,微生物活动增强所致,但菌落总数仍然处于一级鲜肉范围^[37]之内,可安心使用。经不同温度解冻处理后,菌落总数的变化趋势基本与TVB-N含量、电导率一致。综合表明,高湿环境中(RH 90%),0~8℃解冻处理后,猪肉可最大限度维持其新鲜度。

2.6 高湿不同温度解冻后猪肉蛋白的变性程度

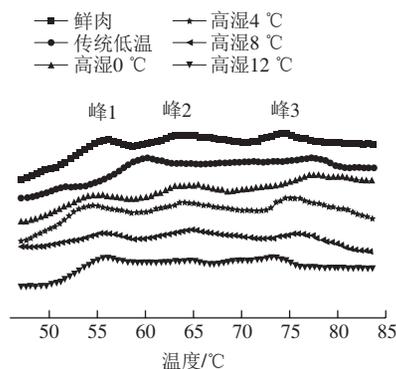


图4 高湿不同温度解冻对肉样品热稳定性影响的DSC分析图谱

Fig. 4 DSC thermograms showing the effect of different thawing temperatures with high humidity on thermal stability of pork samples

由图4可知,鲜肉的热分析图谱在55、65、75℃有3个峰,分别代表肌球蛋白头部变性(峰1)、肌球蛋白尾部和肌浆蛋白变性(峰2)、肌动蛋白变性(峰3)^[37],描述了蛋白分子的展开和加热期蛋白由原始构象转变到变性构象的过程^[21]。表4为DSC分析法所得到的变性温度 T_m 和热焓 ΔH 。从图4和表4中可看出,传统低温解冻后,峰1和峰3的变性温度(60.28℃、77.22℃)较鲜肉明显推后,峰2消失,且峰3的热焓显著下降($P<0.05$),表明传统低温解冻严重影响了猪肉蛋白的变性程度。而高湿环境解冻(RH 90%, 0~12℃)则在不同程度上有所缓

解,其中经0℃处理后,峰3的变性温度(77.53℃)明显推后,与传统低温接近($P>0.05$),且峰2和峰3的热焓值较鲜肉显著降低($P<0.05$),表明0℃(RH 90%)解冻可严重影响肌浆蛋白、肌球蛋白尾部和肌动蛋白的变性,可能与其解冻时间长、汁液损失较大有关;12℃处理后,峰2的峰形变小,且峰2和峰3的热焓均低于鲜样、4℃和8℃处理组,表明12℃(RH 90%)解冻也可严重影响肌浆蛋白、肌球蛋白尾部和肌动蛋白的变性,分析原因可能是解冻温度过高,加速了蛋白质的变性;而经4℃和8℃(RH 90%)解冻后,DSC图谱较鲜肉无明显变化,且热焓值也接近鲜肉水平($P>0.05$),表明4℃和8℃(RH 90%)的解冻处理可有效缓解蛋白的变性程度。

表3 高湿不同温度解冻处理后猪肉肌肉蛋白的变性温度 T_m 和变性热焓 ΔH

Table 3 Denaturation temperature T_m and enthalpy ΔH for muscle proteins of pork samples treated by different thawing methods

组别	峰1		峰2		峰3	
	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
鲜肉	56.38±0.68 ^b	0.30±0.01 ^{bd}	64.37±0.75 ^a	0.23±0.01 ^a	74.67±0.65 ^{bc}	0.18±0.01 ^a
传统低温	60.28±0.25 ^d	0.34±0.01 ^a	—	—	77.22±0.18 ^e	0.13±0.01 ^b
高湿0℃	54.97±0.67 ^d	0.27±0.01 ^d	65.46±0.57 ^a	0.16±0.01 ^b	77.53±0.31 ^e	0.15±0.01 ^b
高湿4℃	55.01±0.43 ^b	0.32±0.01 ^{bd}	64.15±0.37 ^a	0.23±0.01 ^a	75.23±0.89 ^{bc}	0.21±0.01 ^a
高湿8℃	55.85±0.24 ^b	0.29±0.01 ^{bd}	64.88±0.36 ^a	0.22±0.01 ^a	75.58±0.79 ^b	0.19±0.01 ^a
高湿12℃	55.98±0.43 ^b	0.30±0.01 ^{bc}	64.59±0.21 ^a	0.13±0.01 ^b	73.63±0.38 ^e	0.14±0.01 ^b

注:—无数据;同列肩标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.7 高湿不同温度下解冻对猪肉动态流变学特性的影响

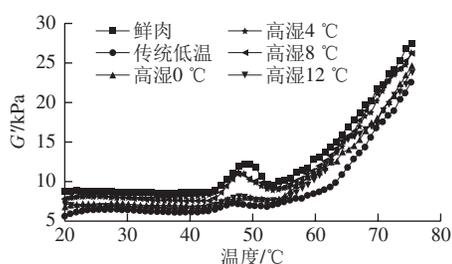


图5 高湿不同温度解冻对肉样品储能模量 G' 的影响

Fig. 5 Effect of different thawing temperatures with high humidity on dynamic storage modulus G' of pork

图5为高湿(RH 90%)不同温度下解冻后,猪肉样品的 G' 随温度(20~80℃)的变化曲线。经打碎处理后,鲜肉的 G' 值呈现如下变化趋势:从20℃起 G' 缓慢下降,直至温度升高至44℃; G' 因猪肉蛋白互作增强而从45℃起增加,直至51℃^[38];但 G' 在52℃~56℃间轻微下降,主要是由于猪肉中肌球蛋白尾部发生变性导致结构遭到破坏;接着 G' 随着温度上升迅速升高,直至温度达到80℃,主要是由于温度升高导致蛋白质发生聚集和进一步交联,黏性胶体变为具弹性的凝胶网络结构^[39]。与鲜肉相比,经不同解冻处理后 G' 均有所下降,

表明凝胶结构遭到不同程度破坏^[27]。其中经传统低温解冻处理后,肉样的 G' (80℃时为22.45 kPa)最低,且在45~56℃之间变化不明显,峰形较弱;而经高湿0℃和12℃解冻处理后,其 G' (80℃时为24.52 kPa和24.09 kPa)明显低于4℃和8℃处理组(80℃时分别为26.36 kPa和26.09 kPa),而且后者的 G' 变化趋势与鲜肉更为接近。综合分析,4℃和8℃(RH 90%)的解冻处理能较好地保持猪肉糜原有的结构特性,对动态流变学特性影响较小。

3 结论

与传统低温解冻相比,高湿(RH 90%)低温(0~12℃)解冻可缩短解冻时间,提高解冻效率,且解冻后猪肉的保水性、色泽、嫩度显著提高,明显抑制脂肪氧化程度,降低蛋白变性程度($P<0.05$),可最大限度维持“鲜肉”的品质。其中高湿环境中(RH 90%),4℃和8℃解冻效果明显优于其他两组处理。相较于0℃解冻,4℃和8℃解冻效率高,且解冻后的猪肉汁液损失少,嫩度高;与12℃解冻相比,4℃和8℃解冻后猪肉的蒸煮损失低,色泽好,可有效抑制微生物滋生,降低有毒有害物质产生,提高新鲜度。同样地,DSC和动态流变学结果也表明4℃和8℃解冻后猪肉蛋白变性程度较低,峰形较好,热焓值与鲜肉水平接近,而且能较好地维持 G' (80℃时分别为26.36 kPa和26.09 kPa)。综上,高湿(RH 90%)低温(4~8℃)解冻是最佳的解冻条件,可有效提高解冻效率,增强保水性,改善肉色、嫩度、缓解蛋白变性,维持猪肉品质。本研究结果拓宽了传统高湿低温(4℃)的温度使用范围,可扩大工业使用范围,降低能耗,同时可解决冷冻猪肉解冻后保水性差、品质严重下降的问题,从而为企业带来效益。

参考文献:

- [1] ZHOU G H, ZHANG W G, XU X L. China's meat industry revolution: challenges and opportunities for the future[J]. Meat Science, 2012, 92(3): 188-196. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.04.016.
- [2] 李建. 强酸性电解水及高压静电场对肉品的杀菌及保鲜效果研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012: 1-15.
- [3] LEYGONIE C, BRRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.01.013.
- [4] 冯晚平, 胡娟. 冷冻食品解冻技术研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(10): 249-252. DOI:10.3969/j.issn.1003-188X.2011.10.059.
- [5] 何向丽. 猪里脊肉冻解冻特性及高压静电场(HVEF)解冻机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016: 19-27.
- [6] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Meat quality comparison between fresh and frozen/thawed ostrich *M. iliofibularis*[J]. Meat Science, 2012, 91(3): 364-368. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.02.020.
- [7] CHANDIRASEKARAN V, THULASI G. Effect of different thawing methods on physico-chemical characteristics of frozen buffalo meat[J]. Journal of Food Technology, 2013, 8(6): 239-242. DOI:10.3923/jftech.2010.239.242.

- [8] XIA Xiufang, KONG Baohua, LIU Jing, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 280-286. DOI:10.1016/j.lwt.2011.09.018.
- [9] ZHANG X, GAO T, SONG L, et al. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017, 52(9): 2097-2105. DOI:10.1111/ijfs.13488.
- [10] MANIOS S G, SKANDAMIS P N. Effect of frozen storage, different thawing methods and cooking processes on the survival of *Salmonella* spp. and *Escherichia coli* O157:H7 in commercially shaped beef patties[J]. Meat Science, 2015, 101: 25-32. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.10.031.
- [11] CHAKANYA C, ARNAUD E, MUCHENJE V, et al. Colour and oxidative stability of mince produced from fresh and frozen/thawed fallow deer (*Dama dama*) meat[J]. Meat Science, 2017, 126: 63-72. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.12.008.
- [12] BOONSUMREI S, CHAIWANICHIRI S, TANTRATIAN S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 292-299. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2006.04.059.
- [13] 谢晶, 华泽钊. 食品在高压静电场中冻结、解冻的实验研究[J]. 食品科学, 2000, 21(11): 14-18. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2000.11.003.
- [14] 李银, 李侠, 贾伟, 等. 低温高湿变温解冻库的研制与应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 244-251. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.02.032.
- [15] 张春晖, 李侠, 李银, 等. 低温高湿变温解冻提高羊肉的品质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 267-273. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.06.033.
- [16] LI Yin, JIA Wei, ZHANG Chunhui, et al. Fluctuated low temperature combined with high-humidity thawing to reduce physicochemical quality deterioration of beef[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(12): 3370-3380. DOI:10.1007/s11947-014-1337-3.
- [17] 张昕, 高天, 宋蕾, 等. 低温解冻相对湿度对鸡胸肉品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 241-246. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201620041.
- [18] 余小颖, 李学斌, 闫利萍, 等. 不同冻结和解冻速率对猪肉保水性和超微结构的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 261-265. DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2007.08.049.
- [19] ADEYEMI K D, SABOW A B, SHITTU, R M, et al. Impact of chill storage on antioxidant status, lipid and protein oxidation, color, drip loss and fatty acids of semimembranosus muscle in goats[J]. CyTA-Journal of Food, 2016, 14(3): 405-414. DOI:10.1080/19476337.2015.1114974.
- [20] BAUBLITS R T, POHLMAN F W, BROWN A H, et al. Effects of sodium chloride, phosphate type and concentration, and pump rate on beef biceps femoris quality and sensory characteristics[J]. Meat Science, 2005, 70(2): 205-214. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.12.011.
- [21] CHANG Haijun, XU Xinglian, ZHOU Guanghong, et al. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1): 285-297. DOI:10.1007/s11947-009-0269-9.
- [22] HE Xiangli, LIU Haijie, NIRASAWA S, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(2): 245-250. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2012.10.023.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品pH值的测定: GB 5009.237—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- [24] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
- [25] 杨秀娟, 张曦, 赵金燕, 等. 应用电导率评价猪肉的新鲜度[J]. 现代食品科技, 2013, 29(5): 1178-1180; 1191. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2013.05.050.
- [26] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- [27] 朱东阳, 康壮丽, 何鸿举, 等. 猪血浆蛋白乳化棕榈油对猪肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 71-75. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201805011.
- [28] HUFF-LONERGAN E, PARRISH F C, ROBAON R M. Effects of postmortem aging time, animal age, and sex on degradation of titin and nebulin in bovine *longissimus* muscle[J]. Journal of Animal Science, 1995, 77(4): 1064-1073. DOI:10.2527/1995.7341064x.
- [29] 余力, 贺雅非, BATJARGAL E, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉品质特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(14): 258-264. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201514049.
- [30] 常海军, 唐翠, 唐春红. 不同解冻方式对猪肉品质特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 1-5. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201410001.
- [31] CHANDHYLASEKARAN V, THULAS G. Effect of different thawing methods on physicochemical characteristics of frozen buffalo meat[J]. Journal of Food Technology, 2010, 8(6): 239-242. DOI:10.3923/jftech.2010.239.242.
- [32] 邸静, 靳焯. 不同解冻方法对牛肉品质的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 174-177.
- [33] TIRONI V, DE LAMBALLERIE M, LE-BAIL A. Quality changes during the frozen storage of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) muscle after pressure shift freezing and pressure assisted thawing[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(4): 565-573. DOI:10.1016/j.ifset.2010.05.001.
- [34] FAUSTMAN C, SPECHT S M, MALKUS L A, et al. Pigment oxidation in ground veal: influence of lipid oxidation, iron and zinc[J]. Meat Science, 1992, 31(3): 351-362. DOI:10.1016/0309-1740(92)90064-B.
- [35] 周光宏, 罗欣, 徐幸莲, 等. 肉品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 10-30.
- [36] 周光宏. 畜产品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 69.
- [37] THORARINSDOTTIR K A, ARASON S, GEIRSDOTTIR M, et al. Changes in myofibrillar proteins during processing of salted cod (*Gadus morhua*) as determined by electrophoresis and differential scanning calorimetry[J]. Food Chemistry, 2002, 77(3): 377-385. DOI:10.1016/S0308-8146(01)00349-1.
- [38] ALI S, ZHANG W G, RAJPUT N, et al. Effect of multiple freeze-thaw cycles on the quality of chicken breast meat[J]. Food Chemistry, 2015, 173(8): 808-814. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.095.
- [39] KANG Z L, LI B, MA H J, et al. Effect of different processing methods and salt content on the physicochemical and rheological properties of meat batters[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(7): 1604-1615. DOI:10.1080/10942912.2015.1105819.