

解冻技术在肉制品中的应用研究进展

刘瑜, 李保国

(上海理工大学, 上海 20082)

摘要: **目的** 对国内外肉品解冻技术的研究进展进行综述, 以提高解冻效率和解冻肉的品质。**方法** 阐述各种解冻技术对肉制品的作用机理, 分析其优势和限制其推广应用的关键问题; 论述应用于牛肉、猪肉和羊肉的解冻工艺, 并对肉品解冻的未来研究方向进行展望。**结论** 各种解冻技术均有利弊, 对于牛肉, 高压静电解冻技术虽是一种极具潜力的新型解冻技术, 但仍存在解冻规模小和生产成本高等问题; 对于猪肉, 低温高湿解冻较适用于实际生产; 对于羊肉, 冷水和低温空气解冻是较为合适的方法。未来可根据不同肉制品的特性, 有针对性地研究其解冻工艺。同时, 也应对组合解冻技术和肉品的预处理技术进行研究, 以提高冻肉的解冻效率和品质。

关键词: 解冻技术; 解冻工艺; 作用机理; 肉类产品

中图分类号: S984.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)05-0065-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.05.008

Research Progress of the Application of Thawing Technology in Meat Products

LIU Yu, LI Bao-guo

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research progress of thawing technology in meat products at home and abroad, in order to improve the thawing efficiency of meat products and maintain the quality of thawed meat. Firstly, the mechanism of various thawing technologies on meat products was expounded to analyze the advantages and the key issues limiting promotion and application of these technologies. Then, the thawing process applied in beef, pork and mutton was discussed, and the future research direction of thawing technology was prospected. Each thawing technology has its advantages and disadvantages. For beef, high-voltage electrostatic thawing technology is a new thawing technology with great potential, but there are still some problems such as small thawing scale and high production cost. For pork, low temperature and high humidity thawing technology is more suitable for actual production. For mutton, cold water and low temperature air thawing technology is a more appropriate method. The future research of meat thawing technology can focus on the applicable thawing process of different meat products based on characteristics. At the same time, the combined thawing technology, and the pretreatment technology need to be studied to improve thawing efficiency and quality of frozen meat.

KEY WORDS: thawing technology; thawing process; mechanism; meat products

收稿日期: 2020-08-06

基金项目: 上海市科技创新行动计划(19391904000); 上海市科技兴农项目(F01469)

作者简介: 刘瑜(1996—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻解冻与太阳能热泵干燥技术。

通信作者: 李保国(1961—), 男, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为食品冷冻、冷藏新技术。

我国是肉类生产与消耗大国,预测到2025年,肉类年消耗量将达到1亿t。随着人民生活水平的提高,对肉类的需求将呈现逐年上升的趋势^[1]。在常温下,肉品极易滋生细菌,导致腐败,冷冻是目前安全可靠、应用广泛的保存方法^[2]。冻肉在后续加工或食用前都需要解冻,解冻的方法和工艺对肉的品质影响较大。若解冻时间长,会引起微生物繁殖,导致肉品腐败变质、脂质氧化等;若解冻时间过短,水分不能被细胞充分吸收,易造成汁液流失、营养价值下降,严重影响了其色泽和鲜度^[3],因此,解冻肉品时,需根据其特性选择合适的解冻方法和工艺。

随着食品工业的快速发展,传统的解冻技术无法满足人们日益增长的高品质肉类需求,急需开发高品质、高效率的新型解冻新技术^[4-5]。近年来,虽然有学者对肉制品的一些新型解冻技术进行了总结,但尚未对不同种类肉品适用的最优解冻工艺,以及在解冻

过程中不同解冻技术对肉制品理化特性的影响进行归纳。鉴于此,文中拟对国内外关于解冻技术在牛肉、猪肉和羊肉制品中的最新应用进行综述,阐述各种解冻技术的技术优势、存在的问题以及对肉制品的作用机理,旨在为从事肉制品解冻的相关人员和我国肉品产业解冻技术的选择提供参考。

1 解冻技术原理

传统的空气、水解冻也称为外部解冻技术,新型解冻技术包括电场、电磁波和真空解冻,解冻过程中产生的热量自内向外传递,也称为内部解冻技术^[6]。电场解冻根据施加电场的频率可分为低频解冻、高频解冻、高压静电场解冻;电磁波解冻包括微波解冻和射频解冻。其他新型解冻技术还包括真空解冻、超声波解冻以及低温高湿解冻技术等^[7-8]。各解冻技术的特点见表1。

表1 不同解冻技术的特点
Tab.1 Characteristics of different thawing technologies

解冻方式	介质	作用机理	优势	不足	
空气解冻	空气	以空气为导热介质,利用对流换热的原理,与冻结肉进行热交换	成本低,适用范围广	汁液和营养损失较高,脂质易氧化	
水解冻	水	利用水-冰之间的理化性质进行热交换达到解冻目的	解冻效率提高,肉类品质损伤减少	微生物污染,营养物质流失	
电解冻	低频解冻	50 Hz 或 60 Hz 的交流电	冻结肉放在电极板之间,电流通过冻结肉产生热量使内部温度升高,融化冰晶	营养成分流失少,持水能力强	受热不均匀,甚至出现烧焦现象
	高频解冻	0.01~300 MHz 的高频交流电	冻肉内部的极性水分子在电场方向快速变化时,发生剧烈旋转振荡,导致分子间反复摩擦产生热量,使冻结肉快速解冻	效率高,无汁液流失,无细菌污染	肉品局部热均匀性差
	高压静电解冻	高压静电场	高压静电场中,带电粒子携带的能量被冰表面水分子吸收,提高了其动能和冰的热导率,能更快地吸收热量	防止油脂酸化,对微生物具有抑制和杀灭作用	肉品内部温度波动大
电磁波解冻	微波解冻	915~2450 MHz 电磁波	在交变电场作用下,使冻结肉中的极性基团剧烈振荡、摩擦,由此将微波能转化为热能	速率快,营养物质损失少,具有显著的抑菌效应	易造成过热效应,设备成本高,完全解冻困难
	射频解冻	3 kHz~300 MHz 交流电磁波	通过电磁场使冻结肉内部的极性分子相互作用产生热量,且粒子携带能量,具有加热效应,可实现内外同时升温	具有较大的穿透性,能有效避免过度加热	对物料的厚度要求较高
真空解冻		真空室产生的低温水蒸气在冻肉表面凝结放出潜热,被吸收后冻肉内部温度升高	能有效避免冻肉氧化变质	部分食品外观不佳,成本较高	
超声波解冻	超声波	肉品吸收超声波的振动能,将其转化为热能,使内部温度升高	效率高,局部过热问题稍有缓解	功率要求高,渗透性差	
低温高湿解冻	低温高湿循环空气	低温高湿循环空气通过冻品表面,使其在相对小的温差状态下缓慢解冻	降低脂肪氧化,提高蛋白溶解度	不能有效防止微生物污染	

2 解冻技术在不同种类肉制品中的应用

2.1 解冻技术在牛肉制品中的应用

牛肉含有丰富的蛋白质、氨基酸,能提高人体的抗病能力,是深受消费者欢迎的优质畜产品。2019年,我国牛肉消费量为 862.9 万 t,同去年相比增长了 11.36%,其中冻结肉占比约为 65%,在我国城乡居民的肉类消费中占较大比重^[9]。由于解冻牛肉的品质在很大程度上与解冻方法有关,因此,国内外学者对牛肉的解冻工艺和新型解冻技术进行了深入研究。

不同部位的牛肉具有不同的品质特性,因此,解冻对其品质性状、肉色、持水能力和粘弹性具有不同的影响。同时,冻结牛肉样品的形状、尺寸、放置方式对解冻后牛肉的品质也有较大影响。Cheng 等^[10]采用低温空气解冻了不同部位(胸肌、腰肌、半膜肌、半腱肌)的牛肉块,结果发现,里脊肉的品质特性受解冻影响较小;与其他部位牛肉相比,解冻后的腿肉半膜肌具有较低的持水力,并发生了较大颜色变化;仅观察到解冻后的腰肌肉嫩度增加。何佳玲等^[11]采用射频解冻技术,研究了不同形状和尺寸的牛后腿肉解冻后品质的差异。结果表明,厚度大的样品虽然解冻速度快,但解冻均匀性较差;当样品厚度相同时,底面积越大,解冻速度越慢,解冻均匀性越好;当样品垂直放置时,长方体样品出现了严重过热现象,圆柱体样品的解冻均匀性相对较好。不同部位的牛肉由于存在不同的肌肉纤维特征,因而对解冻有不同的敏感性,因此在解冻过程中,应选择合适的解冻方法和工艺。针对敏感性较强的牛肉,可采用相对温和的解冻方法,在解冻过程中适当降低介质温度、电场强度和电磁波频率等参数,可防止牛肉品质下降。

尚柯等^[12]研究了静电场解冻对牛背最长肌肌肉

的持水性及蛋白质理化特性的影响。结果表明,与自然解冻相比,解冻时间缩短了 8.92 h,解冻汁液流失率显著降低,蛋白质表面疏水性升高,变性程度降低。Qian 等^[13]研究发现,高压静电场解冻可通过减小对肌肉微观结构的损伤,显著降低解冻损失、蒸煮损失以及蛋白溶解度和剪切力。在高压静电场解冻牛肉的过程中,电场强度、电极板的距离、样品的放置位置和针电极数均会影响解冻后牛肉的品质。李侠等^[14]研究发现,距离静电场极板 30 cm 处的场强效果最好,有利于维持牛肉肌原纤维蛋白的稳定性。马坚^[15]证明针对牛里脊肉,150 kV/m 为最优场强,对极性的水分子聚合物产生明显作用,有助于保持肉组织细胞的完整性,进而减小解冻过程中的汁液损失。Amiri 等^[16]的研究结果表明,针电极数的增加可降低解冻损失;牛肉肌纤维蛋白的持水力、溶解度和凝胶强度随着针电极数的增加而增加。高压静电解冻技术虽然是一种极具潜力的新型解冻保鲜技术,但该技术存在解冻模块较小、电磁辐射安全隐患、生产成本高等问题。

其他牛肉解冻技术见表 2。对于低温高湿、欧姆和微波解冻,解冻介质的温度、湿度、电压、微波频率等虽然可以不同程度地提高解冻效率,改善解冻牛肉的色泽、鲜嫩度、持水率等,但也会对解冻后牛肉的品质造成不良影响。高压欧姆解冻和组合解冻虽然具有快速解冻的优点,并能减少解冻品的质量损失,但较高的解冻成本和投入产出比限制了其发展,需要进一步研究。

2.2 解冻技术在猪肉制品中的应用

猪肉富含蛋白质、脂肪、矿物质等营养物质,具有补虚强身、丰肌泽肤的作用,并因其纤维细软、结缔组织较少,且在肌肉组织中含有较多的肌间脂肪,因此,在人们的日常饮食中占有重要地位^[22]。人们常采用空气解冻、水解冻和低温(高湿)解冻等方法解冻猪肉。近年来,高压电场解冻、超声波解冻、真空

表 2 应用于牛肉的解冻技术
Tab.2 Thawing technologies for beef

文献	解冻方法	样品参数	解冻参数	主要结论
[17]	低温高湿解冻	1 cm×2 cm×1 cm (长×宽×高)	温度为 5 °C,相对湿度为 75%, 98%	相对湿度为 75%下的解冻样品质量优于相对湿度为 98%下的
[18]	欧姆解冻	2.5 cm×2.5 cm×5 cm (长×宽×高)	电压梯度为 10, 20, 30 V/cm	在 30 V/cm 电压梯度下,牛肉的品质较好
[19]	微波解冻	厚度为 5~7 cm, 温度为 -55 °C	频率为 2450 MHz	拥有较高的蒸煮损失、含水率和感官评价
[20]	高压欧姆解冻	外径为 16 mm, 长为 35 mm, 质量为 6 g	压力为 200 MPa, 场强为 40 V/cm	更好地保留了牛肉的纹理和结构的完整性
[21]	组合解冻	80 mm×80 mm×20 mm (长×宽×高), 质量为 (150±2.0)g, 温度为 -18 °C		最优工艺: 首先微波解冻 170 s, 直到表面软化; 然后在 15 °C 下空气解冻, 直到中心温度达到 -8 °C; 最后在 220 W 的超声下解冻, 直到牛肉中心温度为 0 °C

解冻、欧姆解冻和射频解冻等新技术被用于猪肉的解冻。不同的解冻技术和工艺参数对解冻后猪肉的色泽、鲜嫩度、持水率、蛋白活性和营养物质含量等具有不同程度的影响,见表3。

章杰等^[30]研究了空气、冷水、热水、微波、超高压和低温解冻等6种方式对猪背最长肌肉营养价值的影响。结果表明,超高压和热水解冻分别对保持猪肉脂肪酸和蛋白含量具有显著作用;经微波解冻后,猪肉中的必需氨基酸和非必需氨基酸含量最高,营养价值较好。赵水榕^[31]和林墨^[32]等发现,低温解冻猪肉的保水性较好,可改善解冻肉的嫩度和色泽,解冻质量损失在5.03%~5.75%之间,可有效减小汁液流失和脂质氧化,避免蛋白质的分解。郑旭等^[33]研究表明,静水解冻虽能更好地保持猪肉品质,但随着肉样解冻时间延长,解冻肉中的菌落总数与乳酸菌数量均呈波动变化趋势。Wang^[34]和Li^[35]等研究了超声、真空、微波解冻对猪肉解冻效果及猪背最长肌肌纤维蛋白凝胶特性的影响,发现真空和超声可以使蛋白质构象的损伤最小化,有助于肌原纤维蛋白凝胶的形成;微波不利于肌纤维蛋白凝胶的形成,蛋白质的构象被严重破坏。Zhu等^[36]研究发现微波解冻作为一种快速解冻方式,能较好地保持猪肉的保水性和嫩度,解冻后猪肉的蛋白变性程度较低,可有效抑制脂肪氧化;当然,微波解冻时也存在局部过热、解冻不均匀、边缘熟化等现象,解冻工艺有待进一步研究。

为了提高猪肉的解冻效率,有学者先采用盐水对猪肉进行处理,随后与其他解冻技术结合解冻猪肉。Jia等^[37]使用高压静场解冻盐水处理过的冷冻猪肉,研究发现随着盐的质量分数从0%增加到6%,猪肉解冻率提高了近4倍,同时有显著抑制微生物生长的作用。Hong等^[38]探索了盐水浸泡处理结合超声解冻对

猪肉品质的影响,发现解冻后的猪肉质量损失更少,虽然可以更好地保持肌肉细胞的完整性,但盐水处理对解冻猪肉的色泽影响较大。

综上所述,采用不同解冻技术处理猪肉,可以得到不同的效果,超高压和热水解冻分别对保持猪肉的脂肪酸和蛋白含量具有显著作用。经微波解冻后,虽然肌肉中的必需氨基酸和非必需氨基酸含量较高,但不利于肌纤维蛋白凝胶的形成,蛋白质的构象被严重破坏。真空和超声解冻可以使蛋白质构象和肌原纤维蛋白凝胶的损伤最小化。在实际生产过程中,低温高湿解冻适用于猪肉的解冻,其在保证解冻效率的同时,能有效减小解冻对于肉品理化特性和营养品质的影响;虽然也可用于大规模解冻,但解冻环境为微生物提供了有利的环境,肉品表面易腐败变质。未来应更注重将不同解冻技术有机结合,探究联合解冻工艺,如在低温高湿解冻技术的基础上,对物料施加适度的电场,可有效提高抑菌效应和解冻速率。在肉制品中添加不同种类和组分的物质(盐、糖等)或不同的预处理方法也应成为今后的一个重要研究方向。

2.3 解冻技术在羊肉制品中的应用

羊肉因肉质纤细、味道鲜美,以及脂肪和胆固醇的含量比牛肉、猪肉要低,因此,在日常生活中倍受人们青睐,被称之为冬令补品。羊肉解冻需最大限度地保持羊肉特有的品质风味,不当的冻融方式会造成羊肉的汁液流失以及物理特性、化学成分发生改变,严重影响了品质^[39]。孔丰等^[40]考察了冰箱解冻、喷淋解冻、静止空气解冻、流动空气解冻等4种方法对羊肉品质的影响。结果发现,冰箱解冻(温度为4℃)羊肉的pH值最大,喷淋方式解冻(温度为10℃)

表3 应用于猪肉的解冻技术
Tab.3 Thawing technologies for pork

文献	解冻方法	样品参数	解冻参数	主要结论
[23]	真空解冻	4 cm×4 cm×5 cm (长×宽×高), 质量为(40±5)g	解冻压力为1~6 kPa	2 kPa是猪肉真空解冻最佳的解冻压力
[24]	欧姆解冻	直径为3, 4, 5 cm, 温度为-18℃	电势梯度为20, 30, 40 V/cm	电势梯度为40 V/cm时, 解冻速率最大
[25]	高压电场解冻	2 cm×2 cm×4 cm (长×宽×高), 质量为35 g, 温度为-20℃	电压为4, 6, 8, 10 kV	6~8 kV的高压电场可显著提高解冻肉品质
[26]	超声解冻	120 mm×60 mm×35 mm (长×宽×高), 温度为-18℃	超声强度为0.2, 0.4, 0.6 W/cm ²	最优参数为频率为25 kHz, 超声强度为0.6 W/cm ²
[27]	超声波解冻	7 cm×8 cm×2 cm (长×宽×高), 质量为150 g, 温度为-20℃	频率为40 kHz, 功率为100~500 W	200 W为超声波解冻最优功率
[28]	低温高湿解冻	6 cm×5 cm×3.5 cm (长×宽×高), 温度为-18℃	相对湿度为90%, 温度为0, 4, 8, 12℃	温度为4℃时, 可较好地保持猪肉品质
[29]	低温高湿解冻	6 cm×5 cm×3.5 cm (长×宽×高), 质量为150 g, 温度为-18℃	温度为4℃, 相对湿度为80%, 85%, 90%, 95%	90% (相对湿度)为最佳解冻条件

的羊肉汁液流失最少;随着解冻速率的加快,解冻羊肉的酸度、汁液流失率升高,虽然会导致肌红蛋白氧化速率加快,使得羊肉的红色值降低,但可以增加羊肉解冻后的嫩度。柏霜等^[41]研究了自然解冻、静水解冻、流水解冻、微波解冻、低温解冻和超声波解冻等 6 种解冻方式对羊肉品质特性的影响。研究发现,流水解冻能较好地保持羊肉的嫩度和色泽,且羊肉的质量损失、剪切力和 TBARS 值较低;微波解冻因解冻温度高,解冻不均匀,造成大量汁液流失,故解冻损失率较高,影响了羊肉的嫩度与色泽,导致质构特性较差。

在用于羊肉的解冻技术中,超声、射频和微波解冻均可显著提高解冻速率,对羊肉制品的营养组分影

响较小,其理化特性受局部过热现象影响较大,会造成汁液损失,导致熟制后的质构和风味较差。高压电场解冻的效果明显优于微波和超声解冻,汁液损失率较低,能显著提高解冻肉品的色泽。为保证解冻羊肉的风味,防止肉品酸化,应选择解冻速率较慢的解冻方式,冷水和低温空气解冻是较为适宜的方法,不仅可以降低羊肉制品的色泽、嫩度、pH 和质地结构的劣变程度,而且对营养组分的影响相对较小。未来可在空气和水解冻过程中适度施加电磁波、高压电场或超声波等辅助解冻,在发挥新型解冻技术优势的同时,尽可能降低对肉品的损伤和解冻成本,保证解冻羊肉的品质。

羊肉解冻的相关研究见表 4。

表 4 应用于羊肉的解冻技术
Tab.4 Thawing technologies for mutton

文献	解冻方法	样品参数	解冻参数	主要结论
[42]	静止空气解冻	质量为 200 g, 温度为 -60 °C	25, 10, 5 °C 的静止空气	5 °C 空气解冻羊肉的保水性较高
[43]	超声波解冻	质量为(100±5)g, 温度为 -20 °C	频率为 40 kHz, 功率为 20, 180, 240, 300 W	240 W 为超声解冻的最佳解冻功率
[44]	低温高湿解冻	质量为 3.5 kg, 直径为 30 cm, 温度为 -26 °C	温度由 2 °C 升至 6 °C, 再将至 2 °C, 相对湿度大于 90%	变温解冻能显著降低肉品质的劣变程度
[45]	高压静电解冻	质量为 18 kg, 温度为 -18 °C	温度为 4~8 °C, 场强为 2.5~12.5 kV/m	场强为 12.5 kV/m, 解冻羊肉最为鲜嫩
[46]	射频解冻	直径为 2.2 cm, 温度为 -20 °C	频率为 27.12 MHz, 功率为 6 kW	120 mm 极板间距下的热均匀性最好

3 结语

传统解冻技术存在解冻时间长、冻损率大以及解冻后的肉品质较差等问题,新型解冻技术可显著改善这些缺点。虽然不同解冻技术均有独特的优势,但也存在一系列问题。文中对应用于牛肉、猪肉和羊肉的解冻技术进行了综述,针对牛肉解冻,不同部位的牛肉具有不同的肌肉纤维特征,进而对解冻有不同的敏感性,因此,研究适宜的解冻工艺有助于防止牛肉品质下降。虽然,高压静电解冻技术是一种极具潜力的新型解冻技术,但仍存在解冻模块较小和生产成本高等问题。针对猪肉解冻,低温高湿解冻较适用于实际生产,在保证解冻效率的同时,能有效减小解冻对肉品理化特性和营养品质的影响;当然也存在微生物易在肉品表面滋生致使肉品腐败的缺点;针对羊肉解冻,为保证其风味,防止肉品酸化,冷水和低温空气解冻是较为合适的方法,可有效降低羊肉制品的质构和风味劣化。

对未来肉品解冻研究提出了 3 条建议,即在不同肉品的特性及解冻工艺研究方面,通过研究不同种类肉品的特性,进而获得解冻技术的最优工艺;在组合

解冻技术研究方面,对传统解冻技术附加电场、电磁波、微波和超声波等,探究联合解冻的最优工艺;在预处理技术的研究方面,通过预处理技术,改善解冻过程中肉制品的均温性及其解冻后的品质,提高解冻效率。

参考文献:

- [1] 朱文博, 陈永福. 世界和中国肉类消费及展望[J]. 农业展望, 2018, 14(3): 98—109.
ZHU Wen-bo, CHEN Yong-fu. Meat Consumption and Outlook in the World and China[J]. Agricultural Outlook, 2018, 14(3): 98—109.
- [2] 袁琳娜, 李洪军, 王兆明, 等. 新型冷冻和解冻技术在肉类食品中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(2): 220—227.
YUAN Lin-na, LI Hong-jun, WANG Zhao-ming, et al. Research Progress on Novel Freezing and Thawing Technology Applied to Meat Products[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(2): 220—227.
- [3] 张帅, 徐乐, 梁小慧, 等. 肉类冷冻解冻技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16):

- 5363—5368.
- ZHANG Shuai, XU Le, LIANG Xiao-hui, et al. Research Progress of Freezing and Defrosting Technology of Meat Product[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(16): 5363—5368.
- [4] 王芳芳, 张一敏, 罗欣, 等. 冷冻解冻对生鲜肉品质的影响及其新技术研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 295—302.
- WANG Fang-fang, ZHANG Yi-min, LUO Xin, et al. Recent Advances in Effect of Freezing and Thawing on Meat Quality and Development of New Technologies[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 295—302.
- [5] 张馨月, 邓绍林, 胡洋健, 等. 几种新型解冻技术对肉品质影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 293—298.
- ZHANG Xin-yue, DENG Shao-lin, HU Yang-jian, et al. Advances in Effects of Selected Novel Thawing Technologies on Meat Quality[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(12): 293—298.
- [6] 朱明明, 王亚秋, 刘新建, 等. 快速与慢速解冻对冷冻猪肉品质特性及蛋白变性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(23): 23—30.
- ZHU Ming-ming, WANG Ya-qiu, LIU Xin-jian, et al. Effects of Rapid and Slow Thawing Methods on Quality Characteristics and Protein Denaturation of Frozen Pork[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(23): 23—30.
- [7] 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 & Technology*, 2017, 52(9): 2097—2105.
- [8] CAI L, ZHANG W, CAO A, et al. Effects of Ultrasonics Combined with Far Infrared or Microwave Thawing on Protein Denaturation and Moisture Migration of *Sciaenops Ocellatus* (Red Drum)[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55: 96—104.
- [9] UYAR R, BEDANE T F, ERDOGDU F, et al. Radio-frequency Thawing of Food Products—a Computational Study[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 163—171.
- [10] CHENG H, SONG S, JUNG E Y, et al. Comparison of Beef Quality Influenced by Freeze-thawing among Different Beef Cuts Having Different Muscle Fiber Characteristics[J]. *Meat Science*, 2020, 169: 108206.
- [11] 何佳玲, 陈璐, 张汝怡, 等. 不同形状尺寸冷冻牛肉的射频解冻均匀性探究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(2): 122—128.
- HE Jia-ling, CHEN Lu, ZHANG Ru-yi, et al. Study on the Uniformity of Frozen Beef with Various Sizes and Shapes Thawed by Radio Frequency[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(2): 122—128.
- [12] 尚柯, 杨方威, 李侠, 等. 静电场辅助冻结-解冻对肌肉保水性及蛋白理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 157—162.
- SHANG Ke, YANG Fang-wei, LI Xia, et al. Effect of Electrostatic Field-assisted Freezing-thawing on Water-holding Capacity and Physicochemical Characteristics of Beef Muscle Proteins[J]. *Food Science*, 2018, 39(3): 157—162.
- [13] QIAN S, LI X, WANG H, et al. Effects of Low Voltage Electrostatic Field Thawing on the Changes in Physicochemical Properties of Myofibrillar Proteins of Bovine Longissimus Dorsi Muscle[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 140—149.
- [14] 李侠, 杨方威, 王航, 等. 静电场辅助冻结-解冻对牛肉肌原纤维蛋白二级结构的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(9): 1750—1756.
- LI Xia, YANG Fang-wei, WANG Hang, et al. The Effects of Electrostatic Field Assisted Freezing and Thawing on Myofibrillar Protein Secondary Structure[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(9): 1750—1756.
- [15] 马坚. 高压静电场对牛里脊肉冻结和解冻的保鲜研究[J]. *家电科技*, 2018(7): 68—71.
- MA Jian. Preservation Research on Freezing and Thawing Process of Beef Tenderloin Meat in High Voltage Electrostatic Fields[J]. *Journal of Appliance Science & Technology*, 2018(7): 68—71.
- [16] AMIRI A, MOUSAKHANI-GANJEH A, SHAFIEKHANI S, et al. Effect of High Voltage Electrostatic Field Thawing on the Functional and Physicochemical Properties of Myofibrillar Proteins[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 56: 102191.
- [17] 潘晓倩, 张顺亮, 李素, 等. 不同相对湿度对牛肉解冻效率及解冻后品质的影响[J]. *肉类研究*, 2019, 33(9): 25—29.
- PAN Xiao-qian, ZHANG Shun-liang, LI Su, et al. Effect of Different Relative Humidities on Thawing Efficiency and Quality Characteristics of Frozen Beef[J]. *Meat Research*, 2019, 33(9): 25—29.
- [18] TIAN X, WU W, YU Q, et al. Quality and Proteome Changes of Beef M Longissimus Dorsi Cooked Using a Water Bath and Ohmic Heating Process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 259—266.
- [19] KIM Y B, JEONG J Y, KU S K, et al. Effects of Various Thawing Methods on the Quality Characteristics of Frozen Beef[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2013, 33(6): 723—729.

- [20] MIN S G, HONG G P, CHUN J Y, et al. Pressure Ohmic Thawing: a Feasible Approach for the Rapid Thawing of Frozen Meat and Its Effects on Quality Attributes[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9: 564—575.
- [21] JIN J, WANG X D, HAN Y, et al. Combined Beef Thawing Using Response Surface Methodology[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2016, 34: 547—553.
- [22] 袁艳枝, 邓文, 金瑶瑶, 等. 猪肉品质评定指标及影响因素的研究进展[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(1): 31—35.
YUAN Yan-zhi, DENG Wen, JIN Yao-yao, et al. Research Progress on Evaluation Indices and Influencing Factors of Pork Quality[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2020(1): 31—35.
- [23] 宋睿琪, 邹同华, 张坤生, 等. 真空解冻工艺对猪肉品质的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(9): 119—124.
SONG Rui-qi, ZOU Tong-hua, ZHANG Kun-sheng, et al. Effect of Vacuum Thawing Process on Pork Quality[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(9): 119—124.
- [24] 冯晚平, 崔清亮. 冷冻猪肉欧姆加热解冻电势梯度与尺寸对解冻效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(6): 90—94.
FENG Wan-ping, CUI Qing-liang. Effects of Voltage Gradient and Pork Size on Ohmic Heating in Thawing Frozen Pork[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(6): 90—94.
- [25] JIA G, NIRASAWA S, JI X, et al. Physicochemical Changes in Myofibrillar Proteins Extracted from Pork Tenderloin Thawed by a High-voltage Electrostatic Field[J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 910—916.
- [26] GAMBUTEANU C, ALEXE P. Comparison of Thawing Assisted by Low-intensity Ultrasound on Technological Properties of Pork Longissimus Dorsi Muscle[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(4): 2130—2138.
- [27] 蒋奕, 程天赋, 王吉人, 等. 超声波解冻对猪肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2017, 31(11): 14—19.
JIANG Yi, CHENG Tian-fu, WANG Ji-ren, et al. Effect of Ultrasonic Thawing on the Quality Characteristics of Frozen Pork[J]. *Meat Research*, 2017, 31(11): 14—19.
- [28] 朱明明, 彭泽宇, 赵贺开, 等. 低变温高湿解冻对猪肉理化特性、蛋白热变性及流变特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 131—138.
ZHU Ming-ming, PENG Ze-yu, ZHAO He-kai, et al. Effect of Variable Low Temperature Combined with High-humidity Thawing on Physicochemical Characteristics, Thermal Denaturation and Rheological Properties of Pork[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 131—138.
- [29] 彭泽宇, 朱明明, 张海曼, 等. 低温高湿解冻改善猪肉品质特性[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(8): 79—85.
PENG Ze-yu, ZHU Ming-ming, ZHANG Hai-man, et al. Improved Quality Characteristics of Pork Thawed at Low-temperature and High-humidity[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(8): 79—85.
- [30] 章杰, 彭新书, 马丹, 等. 不同解冻方式对猪肉营养价值的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(6): 203—207.
ZHANG Jie, PENG Xin-shu, MA Dan, et al. Effects of Different Thawing Methods on Nutritive Value of Pork[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(6): 203—207.
- [31] 赵水榕, 张怡, 李浩楠, 等. 解冻方式对调理猪肉饼品质的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(4): 759—769.
ZHAO Shui-rong, ZHANG Yi, LI Hao-nan, et al. Effects of Thawing Methods on Quality of Prepared Pork Patties[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(4): 759—769.
- [32] 林墨, 李官浩, 杨慧娟, 等. 不同解冻方式对猪肉食用品质的影响[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(4): 666—671.
LIN Mo, LI Guan-hao, YANG Hui-juan, et al. Effect of Different Thawing Methods on Pork Eating Quality[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(4): 666—671.
- [33] 郑旭, 曾露, 柏先泽, 等. 不同解冻处理对猪肉理化特性及微生物数量的影响[J]. *肉类研究*, 2018, 32(4): 14—19.
ZHENG Xu, ZENG Lu, BAI Xian-ze, et al. Effects of Different Thawing Methods on Pork Physicochemical Properties and Microbial Counts[J]. *Meat Research*, 2018, 32(4): 14—19.
- [34] WANG B, DA X, BK A, et al. Effect of Ultrasound Thawing, Vacuum Thawing, and Microwave Thawing on Gelling Properties of Protein from Porcine Longissimus Dorsi[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 64: 57—67.
- [35] LI F, WANG B, LIU Q, et al. Changes in Myofibrillar Protein Gel Quality of Porcine Longissimus Muscle Induced by Its Structural Modification under Different Thawing Methods[J]. *Meat Science*, 2019, 147: 108—115.
- [36] ZHU M, PENG Z, LU S, et al. Physicochemical Properties and Protein Denaturation of Pork Longissimus Dorsi Muscle Subjected to Six Microwave-based Thawing Methods[J]. *Foods*, 2020, 9(1): 26.
- [37] JIA G, SHA K, MENG J, et al. Effect of High Voltage

- Electrostatic Field Treatment on Thawing Characteristics and Post-thawing Quality of Lightly Salted, Frozen Pork Tenderloin[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 99: 268—275.
- [38] HONG G P, CHUN J Y, JO Y J, et al. Effects of Water or Brine Immersion Thawing Combined with Ultrasound on Quality Attributes of Frozen Pork Loin[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2014, 34: 115—121.
- [39] 刘文莹, 王守伟. 羊肉生产及加工工艺对肉及肉制品品质的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 304—311.
LIU Wen-ying, WANG Shou-wei. Recent Progress in Understanding the Effect of Mutton Production and Processing Technologies on the Quality of Meat and Meat Products[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 304—311.
- [40] 孔丰, 罗瑞明, 吴亮亮. 不同解冻方式对滩羊肉品质的影响研究[J]. *食品安全导刊*, 2015(27): 150.
KONG Feng, LUO Rui-ming, WU Liang-liang. Effects of Different Thawing Methods on the Quality of Mutton Beach[J]. *China Food Safety Magazine*, 2015(27): 150.
- [41] 柏霜, 杨文婷, 牛佳, 等. 不同解冻方式对羊肉臊子品质特性的影响[J]. *中国调味品*, 2017, 42(6): 10—17.
BAI Shuang, YANG Wen-ting, NIU Jia, et al. Effects of Different Thawing Methods on Quality Characteristics of Fried and Diced Mutton[J]. *China Condiment*, 2017, 42(6): 10—17.
- [42] 张丽文, 孔丰, 李俊丽, 等. 不同解冻条件对滩羊肉水分的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(22): 103—107.
ZHANG Li-wen, KONG Feng, LI Jun-li, et al. Effects of Different Thawing Conditions on The Water Content of Tan Sheep Meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(22): 103—107.
- [43] 杜鹏飞, 王维婷, 李孟孟, 等. 超声波解冻对羊肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(1): 39—44.
DU Peng-fei, WANG Wei-ting, LI Meng-meng, et al. Effect of Ultrasonic Thawing on Quality Characteristics of Frozen Mutton[J]. *Meat Research*, 2020, 34(1): 39—44.
- [44] 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.
ZHANG Chun-hui, LI Xia, LI Yin, et al. Low-variable Temperature and High Humidity Thawing Improves Lamb Quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6): 267—273.
- [45] 唐树培, 李保国, 高志新. 高压静电场解冻羊胴体的实验研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 69—73.
TANG Shu-pei, LI Bao-guo, GAO Zhi-xin. Experimental Study on Thawing of Frozen Lamb with High Voltage Electrostatic Field[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(3): 69—73.
- [46] 刘艳. 羊肉射频解冻技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017: 18—32.
LIU Yan. Research on Radio Frequency Thawing Technology of Mutton[D]. Xiayang: Northwest A&F University, 2017: 18—32.