

磁性纳米粒子辅助加热技术在鱼类解冻中的应用

韩敏义^{1,2}, 田惠鑫¹, 曾宪明¹, 张馨月¹, 尹家琪¹,
侯钰柯¹, 白云¹, 唐长波¹, 徐幸莲¹

(1. 农业农村部 肉品加工重点实验室/江苏省肉类生产与加工质量安全控制协同创新中心/南京农业大学 食品科技学院, 江苏 南京 210095; 2. 温氏食品集团股份有限公司, 广东 云浮 527400)

摘要: 随着食品工业的快速发展和消费者安全意识的提高, 人们越来越注重食品质量与安全。冻藏是食品长期贮藏的最常用方法, 但食品品质在冷冻解冻后还存在一些劣变, 如由解冻汁液流失造成的营养损失, 脂质和蛋白质氧化严重, 肌肉纤维组织受到破坏等, 因而寻求一种安全高效的新型解冻技术尤为重要。磁性纳米粒子辅助加热是一种新型食品解冻方法, 它大大改善了传统解冻和新型解冻方法出现的氧化严重、感官不佳等问题。作者综述了食品解冻中存在的品质劣变问题和磁性纳米粒子辅助加热在鱼类解冻中的应用, 以期为该技术在食品解冻中的应用提供参考。

关键词: 鱼类; 解冻; 磁性纳米粒子; 辅助加热

中图分类号: TS 251.5 文章编号: 1673-1689(2021)10-0001-06 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2021.10.001

Application of Magnetic Nanoparticles Assisted Heating Technology in Fish Defrosting

HAN Minyi^{1,2}, TIAN Huixin¹, ZENG Xianming¹, ZHANG Xinyue¹, YIN Jiaqi¹,
HOU Yuke¹, BAI Yun¹, TANG Changbo¹, XU Xinglian¹

(1. Key Laboratory of Meat Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of People's Republic of China/Jiangsu Collaborative Innovation Center of Meat Production and Processing, Quality and Safety Control/College of Food Science and Technology, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China; 2. Wens Food Group Co. Ltd, Yunfu 527400, China)

Abstract: With the rapid development of food industry and the increase in consumer safety awareness, consumers are also paying more and more attention to food quality and safety. Frozen storage is the most common method for long-term storage of food, but there are still some deteriorations in food quality after freezing and thawing, such as the nutrient loss caused by the loss of thawed juice, the serious oxidation of lipids and proteins, and the damage to muscle fiber tissue. Therefore, it is particularly important to seek a new safe and efficient thawing technology. Magnetic nanoparticles assisted heating is a new type of food thawing method, which greatly avoids the conventional problems of traditional thawing and new thawing methods. Magnetic nanoparticle

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2019YFC1606200); 现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-41)。

作者简介: 韩敏义(1975—), 男, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要从事肉品加工与质量控制方面的研究。E-mail: myhan@njau.edu.cn

assisted heating is a new thawing method of food, which greatly improved the comment problems in the traditional and new thawing methods, such as serious oxidation and poor sensory performance. The present article reviews the quality deterioration issues in the thawing of food and the application of magnetic nanoparticle-assisted heating in the thawing of fish, in order to provide reference for the application of this technology in food defrosting.

Keywords: fish, thawing, magnetic nanoparticle, assisted heating

解冻是食品加工或烹饪前进行的重要的工艺过程^[1],选择合适的解冻方法,减少对食品的损伤,保证高质量的生产原料,才能生产出优质食品^[2]。常见的食品解冻方法有空气解冻法、冷藏解冻法、浸泡解冻法、流水解冻法等^[3-5];新型解冻法有微波解冻法、超声波辅助解冻法、高周波解冻法、高压辅助解冻法、高压静电场辅助解冻法等^[6-8]。这些方法在一定程度上减少了解冻时间,减轻了传统解冻方法带来的影响,但还是存在蛋白质和脂质氧化严重、滴水损失高、色泽变差和加热不均匀等造成食品感官不佳的问题,从而影响消费者的购买体验,因此仍需单一或复合解冻技术来提高解冻食品品质。

近年来,生物传热(Bioheat transfer, BHT)技术取得了重大进展。磁性纳米粒子(Magnetic nanoparticles, MNPs)加热作为BHT的一种形式,已被批准并广泛应用在生物材料方面^[9]。Wang等^[10]利用超顺磁 Fe_3O_4 纳米粒子将人脐带干细胞成功复温,结果证明MNPs显著提高加热速率,抑制了再结晶中冰的形成,提高了细胞存活率。研究证实, MNPs辅助解冻可能是一种有前景的方法,可以使生物材料均匀、快速地变温。传统及新型解冻方法都有一些不可避免的问题,如空气解冻耗时长、高压静电场解冻对环境温度要求较高等,而MNPs辅助加热减少了使用单一传统或新型解冻方法对食品的损伤。作者综述了新型解冻技术在鱼产品中存在的品质劣变问题和纳米粒子加热在鱼类解冻中的应用,以期为该技术在食品解冻中的应用提供参考。

1 磁性纳米粒子辅助加热在鱼肉解冻中的应用

生物组织的热导率通常很小,常规的快速加热技术会导致较大的热梯度^[11],会引起色泽、风味和质地等变化。Manuchehrabadi等描述了一种称为“nanowarming(纳米加热)”的新型可扩展技术,利用

氧化铁纳米粒子对冷冻保存的猪心脏瓣膜组织进行更均匀快速地加热解冻^[12]。磁性纳米粒子是由纯金属、金属合金和金属氧化物组成的一类纳米粒子。合成磁性纳米粒子的方法有很多,如共沉淀法、反胶束法、微乳液法、热分解或还原法、水热合成法和激光热解法^[13]。近些年,利用MNPs高吸附性、可回收性、生物相容性等特点在许多方面加以利用。例如合成特定的磁性纳米吸附剂,以期达到快速定向分离的效果^[14];氧化铁纳米粒子在鱼类解冻方面也取得了一定的进展,可使加热更均匀,降低肉品的品质损失。表1~表4列举了单独使用解冻技术对鱼肉品质的影响和利用MNPs辅助加热解冻的实例,并分析了该方法对鱼肉品质的影响。

表1 微波解冻对鱼肉品质的影响

Table 1 Effect of microwave thawing on the quality of fish

对象	效果及品质变化	参考文献
金枪鱼	解冻损失增大, 持水率较小, pH值减小, 红度值降低, 硬度减小。	文献[5]
鲢鱼	L 和 a^* 值上升, b^* 值下降, 嫩度减小, 解冻损失率和蒸煮损失率显著增加, TBARS和羰基含量较高。	文献[15]
鲈鱼	解冻损失小, 弹性较低, pH值升高, 保水性降低。	文献[16]

微波加热缩短了解冻时间,是由于水等极性分子在此环境中剧烈摩擦,将电磁能转换为热能,从而快速解冻。但解冻过程中出现解冻温度局部过高且受热不均匀,不适用于鱼糜的解冻^[6]。微波振动水与其他大分子之间的氢键松弛,导致解冻损失率和蒸煮损失率明显增高,颜色变差、蛋白质变性等问题。在水分流失的同时,其中还含有氨基酸、盐类、维生素类等水溶性成分流失,导致产品的商品价值下降。

表 2 磁性纳米粒子辅助微波加热在鱼肉中的应用

Table 2 Application of magnetic nanoparticles assisted microwave heating in fish

解冻方式	食品种类	品质影响	参考文献
磁性纳米粒子结合微波解冻	鱿鱼	离心损失与对照无差异,解冻损失降低。巯基含量较高,蛋白质氧化速率低,脂质氧化水平最低。很好维持了蛋白质的结构,不易变形、结构紧凑、肌原纤维间隙小、分布均匀。	文献[9]
	红鲷鱼	结合水含量增加,解冻速率提高,蛋白质结构更加稳定,蛋白质的热稳定性好。	文献[4]
	鲈鱼	pH 无明显变化,肌球蛋白头部热稳定性降低,蛋白质构象稳定,巯基减少,蛋白质氧化减少,弹性较低。	文献[17-18]

表 3 远红外解冻对鱼肉品质的影响

Table 3 Effect of far-infrared thawing on the quality of fish

对象	效果及品质变化	参考文献
鲈鱼	解冻损失和蒸煮损失略微增大,pH 减小,蛋白质和脂质氧化程度增加。	文献[19]

表 4 磁性纳米粒子辅助远红外加热在鱼肉中的应用

Table 4 Application of magnetic nanoparticles assisted far-infrared heating in fish

解冻方式	食品种类	品质影响	参考文献
磁性纳米粒子结合远红外解冻	红鲷鱼	保水性能较好,解冻时间减少,蛋白质变性概率降低,蛋白质结构稳定。	文献[4]
	鲈鱼	结合水无明显变化,热稳定性较好,巯基减少,蛋白质氧化水平降低,对脂质氧化影响较小,弹性降低。	文献[17]

与上述单一新型解冻方式相比,MNPs 辅助解冻后对鱼肉品质影响减小,蛋白质氧化速率降低,抑制脂质氧化,降低了解冻损失和蒸煮损失,保水性能更好,同时受热更均匀。总的来说,单一的解冻技术虽然有一定的局限性,但是可以与其他解冻方式结合进行技术改进,提高解冻后的食品品质。磁纳米粒子会通过浓度扩散均匀分布于样品中,研究防冻剂对流加热时发现,小体积材料成功复温,由此提出使用 MNPs 可以提高复温速率和材料活力,并在猪心血管模型中成功应用^[12]。低剂量磁性纳米粒子的摄入对人体健康无副作用,并已获得美国食品和药物管理局的批准^[21],所以 MNPs 辅助加热解冻法是一种前景非常好的解冻方法。

1.1 磁性纳米粒子辅助加热对水分含量的影响

新鲜肉类保持水分的能力是产品最重要的质量特征之一。解冻不仅会改变肉组织中水分的含量和分布,还会导致肉的保水性降低^[23-24]。研究表明,磁性纳米粒子结合微波解冻 (the MNPs combined with microwave thawing, MMT) 的离心损失和解冻损失低于单一解冻方式,解冻损失最低^[9]。微波具有很

文献[19]和文献[20]针对鲈鱼的实验结果一致,远红外解冻后 TBARS 值显著升高,但蒸煮损失率和解冻损失率低。远红外解冻与微波解冻原理类似,在一定程度上依赖于电介质加热解冻的原理,都是利用波长辐射表面产生热量传递至样品中心进行解冻。但比微波的频率更高,波长更短,同样也存在局部过热的问题^[21]。

强的穿透性,可以同时加热冷冻产品的内外部分,加热所需的时间较短,并且通过热传导作用使 MNPs 转变为顺磁状态,抑制了冰晶的再生,从而造成细胞损伤很小^[12]。利用磁性纳米粒子辅助微波解冻和远红外解冻(the MNPs combined with far-infrared thawing, FMT) 研究了红鲷鱼片的水分变化^[4],结果表明 MMT 和 FMT 处理组中不可移动水含量高于对照组,说明通过均匀而快速的热效应增强了保水能力,使游离水回流,减少了解冻时间,增加了鱼片中水的含量。但由于微波振动的机械作用造成水与其他大分子之间的氢键断裂使结合水含量降低。总的来说,由于离子分布在整个样品中,出现了快速和均匀的升温,从而消除了开裂和冰的形成,较好维持了蛋白质和水之间的氢键作用力,从而提高了回收率和组织活力^[25]。

1.2 磁性纳米粒子辅助加热对蛋白质和脂质氧化的影响

水产品在长途运输、储存和消费过程中,由于温度波动,不可避免地会出现反复的冻融(Freeze-thaw, F-T)现象。F-T 循环引起样品中小冰晶的再结

晶和在肌原纤维中的再分布,导致纤维结构的破坏和肌原纤维蛋白的氧化变性^[26]。在研究 MMT 处理鲑鱼时发现,巯基含量升高,平均粒径变小,该方法可使蛋白质和水之间的相互作用更加紧密^[9],维持蛋白质结构的完整性,降低蛋白质的氧化程度^[27],文献[4,17]与文献[9]得出相似的结果。采用分子动力学模拟的方法研究了鲑鱼防冻蛋白与冰晶的相互作用,同样证明壳聚糖磁性纳米粒子在 F-T 循环过程中对蛋白质氧化起到抑制作用^[26]。

1.3 磁性纳米粒子辅助加热解冻对蛋白质结构的影响

冻融循环增加了肌肉纤维断裂程度,改变了肌原纤维蛋白的结构,降低了肌原纤维蛋白功能^[28]。衡量鱼肉质量的主要指标有弹性、口味、质地等,影响凝胶特性的主要成分是鱼肉肌肉中的肌原纤维蛋白^[29]。结果表明,相比较其他解冻方式,FMT 和 MMT 处理组热稳定性和凝胶特性较好^[17]。有研究表明,MMT 和 MFT 样品的 ΔH 值分别略高于 MT 和 FT 样品^[4],说明 MNPs 辅助解冻对解冻效果有一定的改善,在一定程度上增加了蛋白质的热稳定性。采用不同解冻方式研究猪肉的理化特性,发现微波解冻比冷水解冻、冰箱解冻等方法对肉的品质影响大^[28]。

2 其他新兴解冻方法

食品的解冻方法虽然多种多样,既有普通的解冻方法,又有新型的技术,但在实际生产过程中仍面临许多问题^[30]。

超高压辅助解冻减少了解冻时间,但对样品的颜色有一定的影响。将超高压技术应用于金枪鱼解冻发现^[31],超高压解冻比常压解冻缩短解冻时间,而且肉制品的滴水损失率降低,但是由于高压处理使得蛋白质变性,导致鱼肉色泽发生变化。研究表明,使用高压静电场解冻后,金枪鱼鱼身颜色变暗,质地变坏、蛋白质溶解度下降^[32]。由于其复杂性和对大型设备的需求,该方法还未被广泛应用^[7]。高压静水解冻的解冻时间只需常压时间的 1/3^[33],并且增大了肉类的嫩度,但电压过大或过小会导致蛋白质大分子变性。研究发现,在 3.8 kV 下,鱼肉解冻速度更快,解冻时间更短,能够更好保持鱼肉的品质^[34]。在保证解冻时间的同时,有时还需要较好的外观。将罗非鱼进行真空解冻,结果表明,真空解冻降低了

解冻损失率,抑制脂肪氧化,保持较好的新鲜度,但罗非鱼由于真空的环境而变形^[35]。

从实际生产来看,生产者要在现有技术的基础上根据各食品特性来选择合适的解冻方法。当一种解冻技术不够成熟或在某个方面有所欠缺,可以将研究的重点放在新型技术的组合应用上,将传统技术与新型技术相结合,努力实现高效与普遍应用相结合,达到经济效益最大化的目的。

例如,热解冻和非热解冻可以结合使用,微波或超声波可以与真空结合以解冻红鲷鱼片^[4]。较低温度的真空解冻可以减少微波或超声波的负面影响。结果表明,结合使用这些方法与单独使用这些技术中的任何一种相比,肌动蛋白的热稳定性及其三级结构都保留得更好。将红鲷鱼片进行超声辅助真空解冻或微波真空解冻与真空解冻、微波解冻和超声解冻进行了比较,前两种解冻技术较其他解冻方法相比,肌动蛋白的热稳定性没有较大变化^[36]。为了改善微波解冻引起的温度分布不均匀问题,也有一些解决方案可以减小温度变化,当微波解冻与常规加热相结合时,将获得更均匀的加热^[36]。尽管组合方法的效果较好,但操作比单一解冻方法更为复杂,并且能耗较大,所以出现在解冻方法中的问题需要以后解决或避免,同时也需要改进过于复杂的操作。

解冻不仅会改变肉组织中水分的含量和分布,还会导致肉的保水性降低^[23-24]。由于肌肉中大部分水都被包埋在细胞中,因此,水的物理状态会严重影响产品的稳定性、结构和纹理^[37-38]。水分的渗透造成肌球蛋白和肌原纤维蛋白变性、聚集和交联;不饱和脂肪酸被氧化分解为具有特殊气味的小分子物质,导致味道和颜色以及感官都发生了较大的改变^[39]。由于解冻时间过长或解冻温度不均匀,造成食品质量损失较为严重,对水产品影响更为显著。

综上所述,MNPs 辅助加热解冻方法处理样品可以减少蛋白质的聚集,在一定程度上保留细胞内的结合水,降低解冻损失率,减轻对品质的损伤。MNPs 的使用可以使样品受热更均匀,降低解冻时产生的温度差,对食品品质有着积极作用^[40-41]。

3 展望

选择合适的解冻方式对鱼产品的销售和储存具有重大的意义。传统的解冻速度较慢,解冻时

间较长,对肉品外观及质地影响较大,同时需要较大面积的场地。磁性纳米粒子加热技术作为一种新型解冻技术,MNPs当接触交变磁场时,分散在溶液中的MNPs和微球通过Neel-Brown弛豫将电磁能转化为热能,实现物料的加热过程^[42-43],能够更加均匀、快速的加热食品,比其他解冻方法对食品的伤害小,较大程度贴合新鲜样品。研究表明,与MNPs结合的解冻方式缩短了解冻时间,减缓了蛋白质和脂质氧化,证明磁性纳米粒子辅助加热解冻在一定程度上有积极作用。此外,随着纳米颗粒浓度的增加和样品升温速率的变化,大块样品解冻时的温度均一性问题还需要进一步研究。

伴随着磁性纳米粒子的发展,除了上述优点,还需考虑MNPs带来的不利影响以及毒性。对于在鱼肉和其他肉品中采用磁性纳米粒子辅助其他解冻技术,这些颗粒在体内倾向于降解,因此有必要了解颗粒整体和降解产物在体内相互作用的毒性。一些纳米颗粒已显示出毒性作用,例如炎症、溃疡、生长速率下降、生存能力下降以及触发植物和细胞系以及动物模型中的神经行为改变。不同解冻技术对食物的解冻效果差异很大,因此不同的食品解冻采用不同的解冻技术至关重要。随着新型解冻技术的发展,我们需要从客观出发,寻找最优的解冻技术。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 余小领,周光宏,徐幸莲. 肉品冷冻工艺及冻结方法[J]. **食品工业科技**, 2006, 27(5): 199-202.
- [3] BENJAKUL S, SEYMOUR T A, MORRISSEY M T, et al. Physicochemical changes in pacific whiting muscle proteins during iced storage[J]. **Journal of Food Science**, 1997, 62(4): 729-733.
- [4] CAO M, CAO A, WANG J, et al. Effect of magnetic nanoparticles plus microwave or far-infrared thawing on protein conformation changes and moisture migration of red seabream (*Pagrus major*) fillets[J]. **Food Chemistry**, 2018, 266: 498-507.
- [5] 余文晖,王金锋,谢晶. 不同解冻方式对金枪鱼品质的影响[J]. **食品与发酵工业**, 2019, 45(12): 189-197.
- [6] 张馨月,邓绍林,胡洋健,等. 几种新型解冻技术对肉品质的影响研究进展[J]. **食品与发酵工业**, 2020, 46(12): 1-7.
- [7] CAI L, CAO M, REGENSTEIN J, et al. Recent advances in food thawing technologies[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 2019, 18(4): 953-970.
- [8] HOLZWARTH M, KORHUMMEL S, CARLE R, et al. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*Fragaria ananassa* Duch.) [J]. **Food Research International**, 2012, 48(1): 241-248.
- [9] ZHU W, LI Y, BU Y, et al. Effects of nanowarming on water holding capacity, oxidation and protein conformation changes in jumbo squid (*Dosidicus gigas*) mantles[J]. **LWT – Food Science and Technology**, 2020, 129: 1-26.
- [10] WANG J, ZHAO G, ZHANG Z, et al. Magnetic induction heating of superparamagnetic nanoparticles during rewarming augments the recovery of huem-mscs cryopreserved by vitrification[J]. **Acta Biomaterialia**, 2016, 33: 264-274.
- [11] PEGG D E, JACOBSEN I A, DIAPER M P, et al. The effect of cooling and warming rate on cortical cell function of glycerolized rabbit kidneys[J]. **Cryobiology**, 1984, 21(5): 529-535.
- [12] MANUCHEHRABADI N, GAO Z, ZHANG J, et al. Improved tissue cryopreservation using inductive heating of magnetic nanoparticles[J]. **Science Translational Medicine**, 2017, 9(379): 1-10.
- [13] MALHOTRA N, LEE J S, LIMAN R A D, et al. Potential toxicity of iron oxide magnetic nanoparticles: a review[J]. **Molecules**, 2020, 25(14): 1-26.
- [14] ABDELHAI SENOSY I, LU Z H, MAHMOUD ABDELRAHMAN T, et al. The post-modification of magnetic metal-organic frameworks with β -cyclodextrin for the efficient removal of fungicides from environmental water[J]. **Environmental Science: Nano**, 2020, 7(7): 2087-2101.
- [15] 张树峰,陈丽丽,赵利,等. 不同解冻方法对脆肉鲩鱼肉品质特性的影响[J]. **河南工业大学学报(自然科学版)**, 2019, 40(3): 56-62.
- [16] 万江丽,励建荣. 不同解冻方式对大口黑鲈品质的影响[D]. 锦州:渤海大学, 2020.
- [17] CAI L, WAN J, LI X, et al. Effects of different thawing methods on conformation and oxidation of myofibrillar protein from

- largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. **Journal of Food Science**, 2020, 85(8):2470-2480.
- [18] CAI L, WAN J, LI X, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and structure of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. **Journal of Food Science**, 2020, 85(3):582-591.
- [19] 蔡路昀, 许晴, 曹爱玲. 不同超声辅助解冻方式对海鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24):1-14.
- [20] 许晴. 五种超声辅助解冻方式对海鲈鱼品质的影响[D]. 锦州:渤海大学, 2020.
- [21] 代雨菲. 模拟贮运温度与不同解冻方式对真鲷品质变化的影响[D]. 锦州:渤海大学, 2020.
- [22] KIM B Y S, RUTKA J T, CHAN W C W. Nanomedicine [J]. **New England Journal of Medicine**, 2010, 363(25):2434-2443.
- [23] AÑÓNMC, CALVELO A. Freezing rate effects on the drip loss of frozen beef [J]. **Meat Science**, 1980, 4(1):1-14.
- [24] VIEIRA C, DIAZ M T, MARTINEZ B, et al. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing [J]. **Meat Science**, 2009, 83(3):398-404.
- [25] GAO Z, RING H L, SHARMA A, et al. preparation of scalable silica-coated iron oxide nanoparticles for nanowarming [J]. **Advanced Science**, 2020, 7(4):1-12.
- [26] NIAN L, CAO A, CAI L. Investigation of the antifreeze mechanism and effect on quality characteristics of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) during F-T cycles by hAFP [J]. **Food Chemistry**, 2020, 325:1-10.
- [27] ZHANG M, LI F, DIAO X, et al. Moisture migration, microstructure damage and protein structure changes in porcine longissimus muscle as influenced by multiple freeze-thaw cycles [J]. **Meat Science**, 2017, 133:10-18.
- [28] XIA X, KONG B, LIU J, 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.
- [29] 何阳春, 洪咏平. 鱼糜制品弹性与鱼肉凝胶特性研究进展 [J]. 水产科学, 2004(6):41-43.
- [30] 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.
- [31] TAKAI R, KOZHIMA T T, SUZUKI T. New challenges in refrigeration. Proceedings of the XVIII International Congress of Refrigeration [C]. Montreal: International Institute of Refrigeration, 1991.
- [32] MOUSAKHANI-GANJEH A, HAMDAMI N, SOLTANIZADEH N. Thawing of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) using still air method combined with a high voltage electrostatic field [J]. **Journal of Food Engineering**, 2016, 169:149-154.
- [33] MOUSAKHANI-GANJEH A, HAMDAMI N, SOLTANIZADEH N. Impact of high voltage electric field thawing on the quality of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*) [J]. **Journal of Food Engineering**, 2015, 156:39-44.
- [34] 唐梦. 高压静电场解冻对罗非鱼片品质影响及其机理的研究 [D]. 上海:上海海洋大学, 2017.
- [35] 张珂, 关志强, 李敏, 等. 真空解冻工艺对罗非鱼片品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(8):281-285.
- [36] FUNG D Y C, CUNNINGHAM F E. Effect of microwaves on microorganisms in foods [J]. **Journal of Food Protection**, 1980, 43(8):641-650.
- [37] HUFF-LONERGAN E, LONERGAN S M. Mechanisms of water-holding capacity of meat; the role of postmortem biochemical and structural changes [J]. **Meat Science**, 2005, 71(1):194-204.
- [38] NDOYE F T, ALVAREZ G. Characterization of ice recrystallization in ice cream during storage using the focused beam reflectance measurement [J]. **Journal of Food Engineering**, 2015, 148:24-34.
- [39] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage [J]. **Food Research International**, 2003, 36(8):787-795.
- [40] WANG T, ZHAO G, LIANG X M, et al. Numerical simulation of the effect of superparamagnetic nanoparticles on microwave rewarming of cryopreserved tissues [J]. **Cryobiology**, 2014, 68(2):234-243.
- [41] ETHERIDGE M L, XU Y, ROTT L, et al. RF heating of magnetic nanoparticles improves the thawing of cryopreserved biomaterials [J]. **Technology**, 2014, 2(3):229-242.
- [42] ROSENSWEIG R E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field [J]. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 2002, 252:370-374.
- [43] WANG G, WAN Z, YANG X. Induction heating by magnetic microbeads for pasteurization of liquid whole eggs [J]. **Journal of Food Engineering**, 2020, 284:1-9.