

文章编号: 1674-5566(2025)01-0212-11

DOI: 10.12024/jsou.20241104704

静磁场辅助冻结对竹节虾冻结质量的影响

丁国庆^{1,2,3}, 杨大章^{1,2,3}, 谢晶^{1,2,4}, 梅俊^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 上海市冷链装备性能与节能检测评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 农业农村部冷藏和制冷设备质量监督检验检测中心, 上海 201306; 4. 国家食品科学与工程实验教学示范中心(上海海洋大学), 上海 201306)

摘要: 冷冻是一种常见的食品保存方法, 但传统冷冻技术会形成大量不规则的冰晶, 影响水产品口感和营养价值。建立了一个基于冲击式速冻机的静磁场辅助冷冻系统, 旨在提升冷冻品质, 减小冻结过程对水产品的不利影响。实验研究了不同强度(0、20、40、60、80 Gs)的静磁场(Static magnetic field)对冷冻竹节虾(*Penaeus japonicus*)水分分布和理化性质的影响。结果显示, 静磁场辅助冷冻技术缩短了相变时间, 磁场强度越大, 相变时间越短。磁场辅助冷冻技术还显著地减小了解冻损失、蒸煮损失和离心损失。其中SMF-80组蒸煮损失和离心损失与新鲜组并无显著性差异, 表明磁场辅助冷冻能够有效减小竹节虾水分损失。低场核磁共振显示施加静磁场后, 固定水和自由水的迁移和损失降低了。静磁场加快冷冻速率, 抑制了虾样品L*值的增加, DSC分析显示竹节虾蛋白质热稳定性增加, 表明施加静磁场能够减小对蛋白质结构的破坏。静磁场辅助冷冻技术改善了冻融过后竹节虾的硬度、咀嚼性和弹性, 提升了竹节虾的口感。综上, 静磁场辅助冻结系统有效改善了冷冻竹节虾的品质, 减小了冷冻过程对竹节虾口感和营养价值的不良影响。

关键词: 竹节虾; 静磁场; 冻结曲线; 持水力; 水分分布

中图分类号: S 983 **文献标志码:** A

水产品是重要的食品来源, 富含蛋白质及各种微量元素, 符合人们对健康饮食的需求, 近几年, 中国水产行业稳步推进, 产量快速提升^[1]。2023年全国水产品总产量为7 116.17万t, 同比增长3.64%。竹节虾(*Penaeus japonicus*)全国海水养殖产量为4.6万t, 在海水养殖虾类中排名第三, 海水养殖面积2.2万hm², 同类型排名第二^[2]。竹节虾含有较高的虾青素、鲜味氨基酸、锌、铁等有益元素^[3]。

低温状态下, 附着在食物上的微生物新陈代谢活动会降到一个较低的水平, 食物中酶的活性会受到较强的抑制, 食物的保鲜周期得到延长^[4]。相较于非冻结的冷藏, 冻藏温度更低, 长时间保存食品更有优势。但是水产品经冷冻之后会对口感和营养价值产生不利影响。研究^[5]表明冷冻产品的质量受到冷冻过程中冰晶形态和冰晶分

布的显著影响。小而均匀的冰晶可以减少组织和细胞的机械损伤, 减少冷冻和解冻过程中肌肉的汁液损失, 从而达到最佳食品保存效果^[6]。

研究人员致力于在传统冷冻方法的基础上施加超声波、高压、微波等物理场, 减小冷冻对水产品的破坏^[7]。磁场辅助冷冻利用磁场对水分结晶的影响, 加快水产品冷冻速率, 减小冷冻形成的冰晶体积, 降低冷冻造成的肌肉组织间损伤, 提高水产品冷冻质量, 延长贮藏期^[6]。磁场辅助冷冻具有无毒害、食材营养保持率高、对肌肉组织伤害小等优点, 符合食品安全法规, 效益可观。

前人的研究尚未完全揭示出磁场对食品的影响机理。一些研究人员认为磁场暴露可能会改变某些细菌的细胞生长、活力和基因表达, 导致微生物数量减少并抑制细胞代谢活动, 减缓食品的腐败过程^[8]。一些研究表明电磁处理能够缩

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2024-12-28

基金项目: 上海市冷链装备性能与节能检测评价专业技术服务平台项目(20DZ2292200)

作者简介: 丁国庆(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品低温保鲜技术。E-mail: 18856723974@163.com

通信作者: 杨大章, E-mail: ydz201@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

短冷冻时间,引发二次冰核,在冷冻产品中产生微小的冰晶^[9]。也有一些研究人员认为磁场的作用会影响水分子团簇的稳定性,使大水分子团簇断裂形成更加稳定的小水分子团簇,在冻结相变过程中,形成小而多的冰晶,减少对样品细胞结构的破坏^[10]。

磁场辅助冻结是否具有积极影响仍然存在一定的争议,一些研究^[11-12]发现,磁场辅助冻结对于冻结效果没有显著影响,但这可能和未使用合适的磁场强度有关,一些研究发现,磁场辅助冻结技术对于不同种类的样品具有不同的影响效果。PURNELL 等^[13]和 KIM 等^[14]的研究表明不同种类的样品具有不同的最适磁场。由此可见,在实际使用磁场辅助冻结方法的过程中,需针对不同的样品采用不同的磁场强度。因此本文将设置 5 组梯度强度静磁场研究其对竹节虾冻结质量的影响,为方便表达根据磁场强度分别表示为 SMF-0、SMF-20、SMF-40、SMF-60 和 SMF-80, F 表示新鲜组。

1 材料与方法

1.1 磁场生成装置

磁场辅助冷冻系统主要包括磁场发生器、冷冻装置、监控系统。磁场发生器由赫姆霍兹线圈和直流电源组成,赫姆霍兹线圈具有开敞性,能够制造小范围区域均匀磁场。赫姆霍兹线圈由亚克力板进行固定,线圈和样品之间添加隔热材料,减小线圈热效应对实验结果的影响。直流电源选用 YH-2 000W-80,额定功率为 2 000 W,电压可调范围为 0~80 V,电流可调范围为 0~25 A。冷冻装置由冷库、冲击式速冻机组成,冷冻过程在冷库中进行,使用冲击式速冻机均匀风速对冷冻样品降温,风速设置为 2 m/s。监测系统包括温度监测和磁场强度检测。T 型热电偶和数据采集仪连接,热电偶测量的一端插入实验对象的中心位置(第三腹节)测量温度,数据采集仪与电脑连接,实时监测样品中心温度。直流电源上实时显示电路中的电流,监控磁场强度。磁场辅助冷冻系统如图 1 所示,使用 COMSOL 软件仿真赫姆霍兹线圈磁场分布情况如图 2 所示,磁场较为均匀。

1.2 实验方法

1.2.1 虾的前处理

均匀大小的活竹节虾样品(25~35 只/500 g)

购于中国上海芦潮港水产市场。到实验室后,去头,取虾样,体质量(10 ± 0.5)g,体长(10 ± 0.5)cm。用滤纸吸干样品表面水分后,所有的样品被随机分成 6 个等份。将虾样品放置在磁场生成器的固定位置。磁场强度分别设置为 0 Gs(SMF-0)、20 Gs(SMF-20)、40 Gs(SMF-40)、60 Gs(SMF-60)和 80 Gs(SMF-80)。调整电压,磁场稳定后,对竹节虾样品进行冷冻处理。分组冷冻样品,前一组冷冻完成后,调整磁场强度,待磁场重新稳定在目标强度后,开始下一组样品的冷冻。当样品中心温度达到 -18 °C时,样品被转移到 -18 °C冰箱内。经过 3 d 的冷冻贮藏,竹节虾冻结的更加稳定和均匀,这一状态与冷链运输后的状态相近。随后,将竹节虾转移至 4 °C 的冰箱中进行解冻,直至其中心温度升至 4 °C,为后续测量做准备。

1.2.2 冻结曲线的测定

冷冻前,将连接到数据采集仪(Fluke 2460A)的 T 型热电偶探头(直径 1 mm)插入整虾的第三腹节中心,冷冻过程中检测其中心温度变化,数据采集仪连接计算机,在计算机上监测样品温度,温度测定频率:1 s/次。

1.2.3 解冻损失的测定

样品 -18 °C 冷冻保存 3 d 后,在普通冰箱(4 °C)中解冻,直至样品中心温度达到 4 °C。用滤纸将虾表面的水分吸干,测量解冻前(W_0)和解冻后(W_1)虾的质量。做 3 次平行,取平均值。解冻损失率计算公式:

$$X_T = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_T 为竹节虾的解冻损失率,%; W_0 为竹节虾解冻前的质量,g; W_1 为竹节虾解冻后的质量,g。

1.2.4 蒸煮损失的测定

称取(2.0 ± 0.5)g 的样品,用滤纸包裹后放入密封袋中,将密封袋置于 80 °C 水浴锅中蒸 6 min。用滤纸吸干样品表面的水。称量蒸前后样品的重量,分别记为 W_2 和 W_3 。做 3 次平行,取平均值,计算公式:

$$X_{Co} = \frac{W_2 - W_3}{W_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: X_{Co} 为竹节虾的蒸熟损失率,%; W_2 为竹节虾蒸熟前的质量,g; W_3 为竹节虾蒸熟后的质量,g。

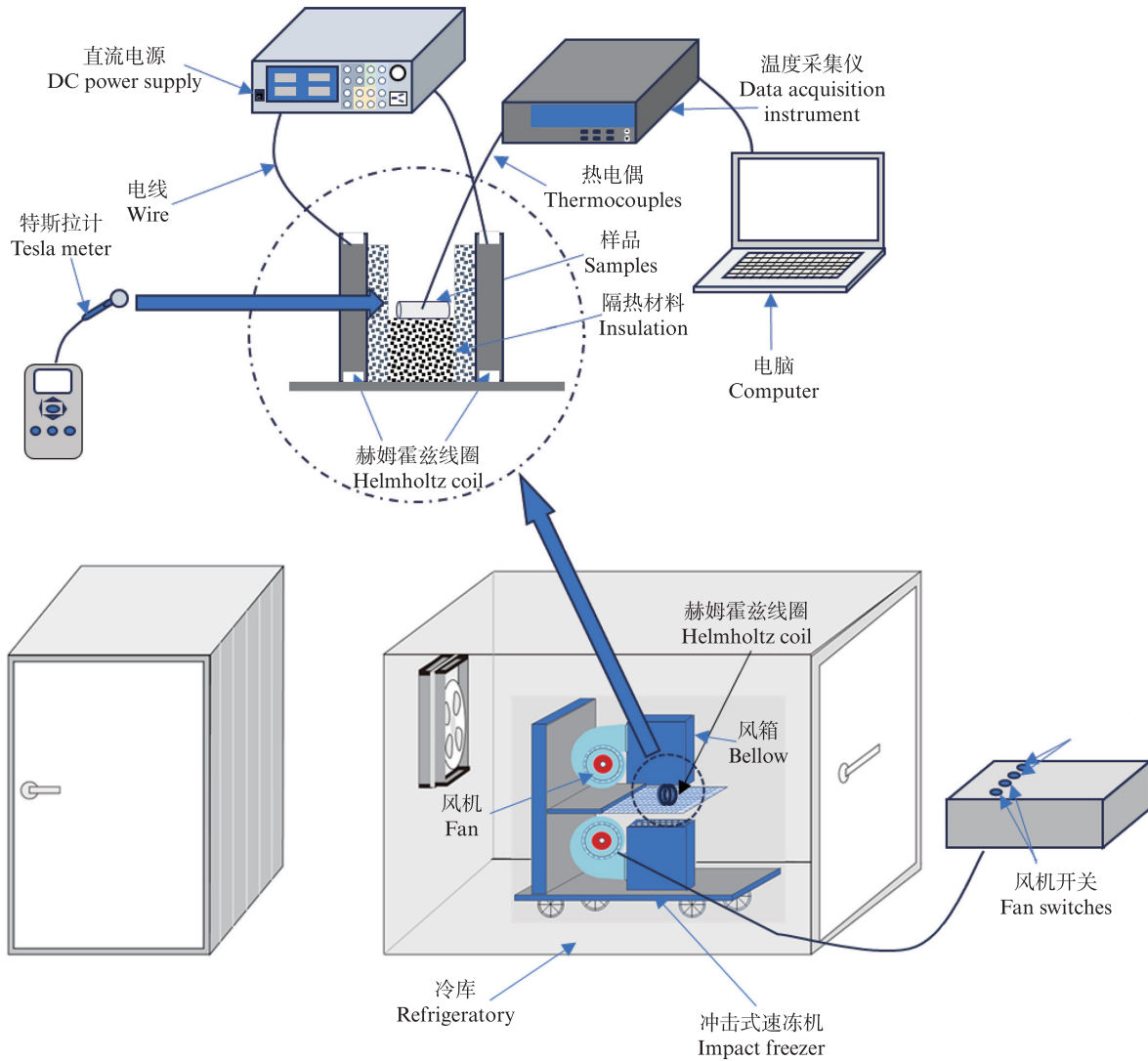


图1 磁场冷冻机示意图

Fig. 1 Schematic of the magnetic field freezer

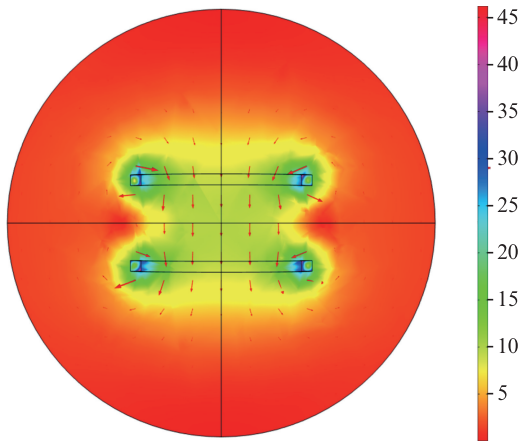


图2 Comsol仿真磁场分布

Fig. 2 Simulated magnetic field distribution by Comsol

1. 2. 5 离心损失的测定

称取(2.0±0.5)g的样品,用两层滤纸包好置

于离心管中,5 000 r/min,4 °C离心 10 min,称量离心前后样品的质量,分别记为 W_4 和 W_5 ,离心损失率计算公式:

$$X_{CE} = \frac{W_4 - W_5}{W_4} \times 100\% \quad (3)$$

式中: X_{CE} 为竹节虾的离心损失率,%; W_4 为竹节虾离心前的质量,g; W_5 为竹节虾离心后的质量,g。

1. 2. 6 低场核磁共振和磁共振成像分析

取切好的虾样,用保鲜膜包裹,放入核磁共振成像分析仪(纽迈 MesoMR23)直径为 60 mm 的核磁检测管中。根据 CPMG 指数衰减曲线图,用分析软件进行迭代反演得到横向弛豫时间 T_2 图谱。用成像软件得到样品水分分布图。

1.2.7 色差

用台式分光测色仪(YS6010)对解冻后的虾肉样品进行色值测定。用标准黑、白板校正后开始测量。通过测量的 L^* 、 a^* 和 b^* 值来表征样品色值,其中, L^* 表示明度。每组样品进行3次平行实验。

1.2.8 DSC测定

称取15~20 mg 虾肉样品,在坩埚中压实,并使用差示扫描量热计(TA Q2000)进行分析。一个空的铝坩埚被密封起来以作比较。样品以10 °C/min 的速度从20 °C加热到100 °C。利用TA通用分析软件从热图中确定了最大变性温度(T_{max})和变性焓(ΔH)。

1.2.9 质构

取第1、2节虾身,其重量约为2 g,利用质构仪(TA.XT-plus)分析其质构变化,测试条件:测试前速率:2 mm/s;测试速率:1 mm/s;测试后速率:2 mm/s;压缩程度:50%;停留间隔5 s。

1.2.10 统计分析

所有数据用SPSS软件(26.0版,SPSS Inc.,芝加哥,美国),表示为平均值±偏差。单因素方差分析和Waller-Duncan检验主效应的显著性($P < 0.05$)。采用混合程序分析了竹节虾水分特性和理化特性变化的数据,不同冷冻处理方法横向对比。所有实验均进行3次独立试验。

2 结果与讨论

2.1 冻结曲线

图3中显示了本次实验过程中典型的冻结曲线,冻结过程中,过冷度并不明显,只有SMF-20

和SMF-60两组出现了较小的过冷现象,冷冬梅等^[15]在研究不同冻结温度对斑点叉尾鲷冻结质量的影响时发现,-18 °C冷冻条件下出现明显过冷度,-40 °C条件下,冻结速度更快,但是过冷现象消失了。这表明过冷现象受到冻结温度和速度的影响,过快的冻结速度会使过冷减弱甚至消失。

冻结曲线显示的温度范围为-18 °C~4 °C。根据冷冻曲线的实际状况,将冷冻曲线大致分为3个阶段:预冷阶段(-2.5~4 °C)、相变阶段(-7.5~-2.5 °C)和过冷阶段(-18~-7.5 °C)。对样品在每个阶段所用时间进行统计,见表1。由于样品与冷冻室内温差显著,在预冷阶段,样品的温度迅速下降,SMF-80组的预冷时间相对于SMF-0组缩短了55.6%,施加磁场的实验组中,SMF-20所用时间最长,但相较于SMF-0组缩短了48 s,表明磁场有利于缩短竹节虾的预冷时间。

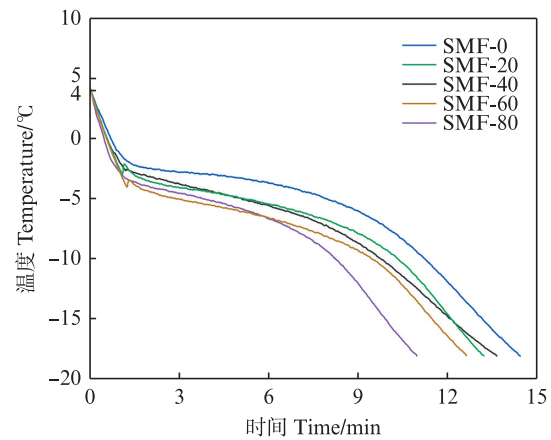


图3 冻结过程中竹节虾温度变化曲线
Fig. 3 Temperature change curve of *Penaeus japonicus* during freezing

表1 各冷冻阶段时间

Tab. 1 Time spent in each phase for each treatment group

组别 Groups	预冷时间 Pre-cooling time/s	相变时间 Phase transition time/s	过冷时间 Subcooling time/s	总冷冻时间 Total freezing time/s
SMF-0	124	475	264	863
SMF-20	76	444	272	797
SMF-40	69	418	332	819
SMF-60	57	377	323	757
SMF-80	55	350	252	657

相变阶段是冻结过程中冰晶生成的阶段,相变时间越短,冰晶的生长时间更短,冰晶多而小,对细胞结构的影响更小,有利于提高冻品的冻结

质量。如图1所示,相变阶段样品温度变化缓慢,这是因为相变过程是潜热的释放,和预冷阶段的结论类似,SMF-80组的相变时间最短为350 s,相

较于 SMF-0 组缩短了 26.3%, 其余各组按时长大小依次为 SMF-60、SMF-40、SMF-20。这可能是因为在冷冻期间会提高导热效率, 进而降低通过最大冰晶生成带的时间^[16]。过冷阶段由于肌肉内部的大部分水被冻结, 传热系数增加, 温度迅速下降, 过冷阶段对冻结质量的影响不大^[17]。

2.2 水分特性

2.2.1 持水力分析

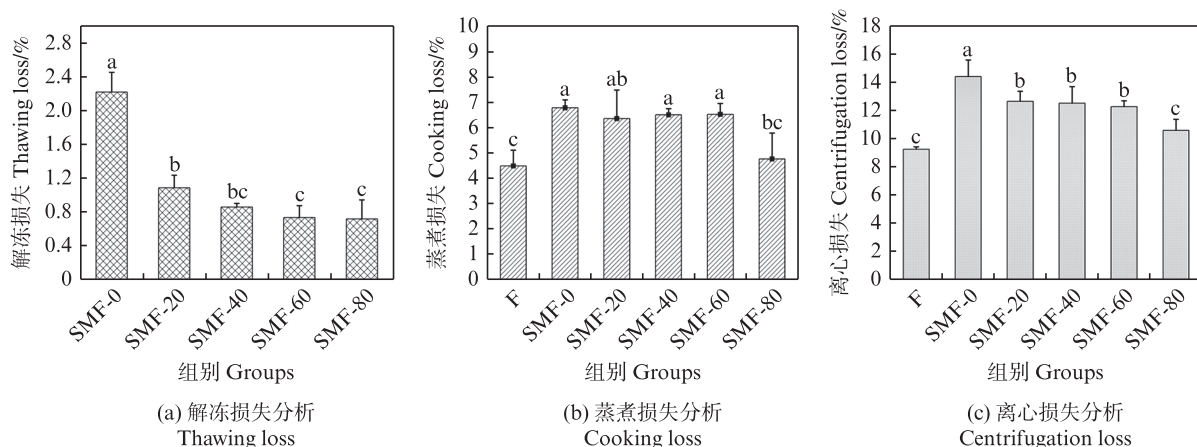
水分损失可用来表征冷冻过程、冻藏过程和解冻过程引起的结构损伤程度^[18]。水分损失会影响肉制品的质量、外观和感官特性。

冷冻和解冻会改变虾肉的水分含量, 因此解冻损失可以用作评价虾肉品质的重要指标^[19]。从图 4a 中能看出, SMF-0 组的解冻损失最大, 同施加磁场的样品具有显著性差异, 说明磁场能够改善竹节虾的冻结质量, SMF-20、SMF-40 两组之间并无显著性差异, 一定强度范围内磁场对竹节虾冻结质量的影响相当。SMF-80 组解冻损失最小, 相较于 SMF-0 组减小了 67.4%。随着磁场强度从 0 Gs 增加到 40 Gs, 解冻损失逐渐减小, 表明在一定范围内, 磁场强度与竹节虾冻结质量呈现正相关, 磁场强度越大, 冷冻过程对竹节虾微观结构的破坏越小。KAUR 等^[20]研究磁场辅助冷冻对于番茄冻结质量的影响时, 同样发现施加磁场后番茄的解冻损失与未施加磁场条件具有显著差异, 他们将这种结果解释为磁场使样品发生快速冻结, 形成均匀的冰晶, 对细胞结构的损

伤更小。

蒸煮损失是指在加热过程中样品内液体和少量可溶性物质的损失。冷冻过程会降低蛋白质网络的稳定性并影响蛋白质与水的相互作用, 使样品的蒸煮损失发生变化^[21]。如图 4b 所示, 随着磁场强度的增大, 蒸煮损失先基本不变, 在 SMF-80 组出现显著差异, 表明一定强度的磁场能够有效减小竹节虾的蒸煮损失。LI 等^[22]、WANG 等^[23]、HU 等^[24]在对磁场辅助冻结技术的研究中发现磁场对冰晶的成核和生长有明显的控制作用, 对蛋白质网络的损伤有抑制作用。磁场辅助冷冻过程的冻结时间短, 冻结速度快, 产生的冰晶更细小, 降低蒸煮损失。

离心损失是指肌肉在受到外力作用时保持其原始水分的能力, 保水能力的变化与肌纤维细胞的结构完整性和蛋白质分子结构的变化有关。在冻结过程中, 冰晶的形成使结合水和蛋白质分子分离, 导致蛋白质侧链的聚集和变性。此外, 细胞中溶质浓度升高也会加快蛋白质变性, 降低肌肉的持水能力。由图 4c 可知, 随着磁场强度的增大, 离心损失逐渐减小。SMF-0 组的离心损失最大, 与其他组之间存在显著性差异, 实验组 SMF-20、SMF-40 和 SMF-60 之间并无显著性差异, 各实验组中 SMF-80 组的离心损失最小, 为 10.6%, 相较于 SMF-0 组减小了 26.4%。同时, SMF-80 和新鲜组之间并无显著性差异, 表明静磁场能够有效改善竹节虾的冻结质量。



不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 4 解冻、蒸熟、离心前后样品的水分变化

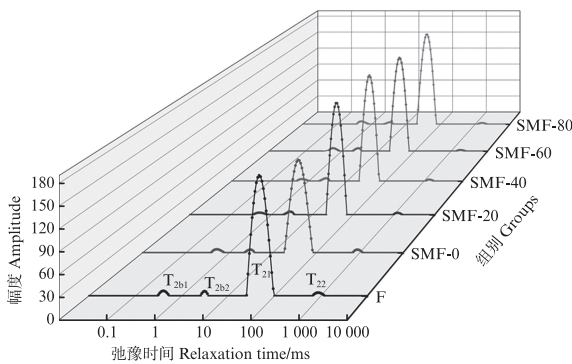
Fig. 4 Moisture changes in samples after thawing, cooking and centrifugation

2.2.2 水分分布分析

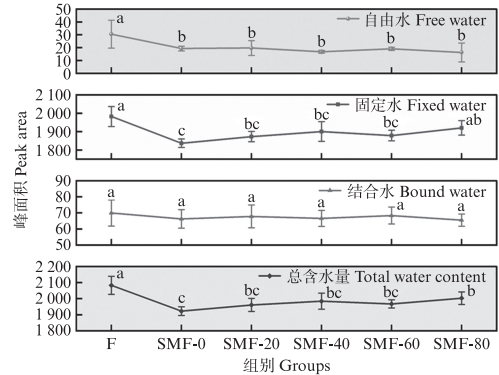
低场核磁共振(LF-NMR)是目前广泛用于测定食品中水分分布的非破坏性方法[25]。T_{2b1}和T_{2b2}分别代表强结合水和弱结合水。T₂₁代表肌原纤维蛋白致密网络中存在的固定水,T₂₂代表纤维束之间存在的自由水,取决于毛细作用力[26]。CARNEIRO等[27]使用低场核磁共振技术研究三聚磷酸钠对冷冻对虾的品质影响,将水分分布状况与其他理化指标对比分析,发现低场核磁共振技术可以用于表征样品的冻结质量。

各组的核磁共振典型曲线如图5a所示,施加静磁场明显改善竹节虾水分损失,固定水含量相较于SMF-0组明显提高。图5b和图5c展现了6

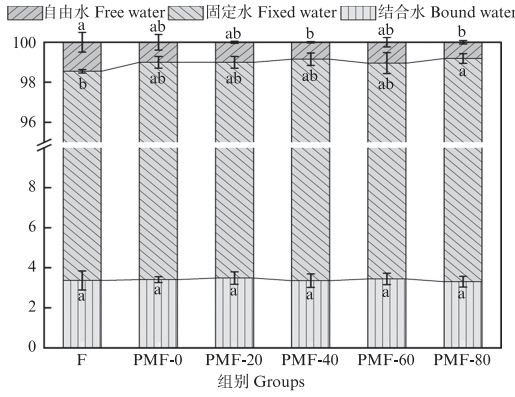
组样品中3种水分的含量和占比。其中各组之间结合水含量并无显著性差异,说明快速冻结过程对竹节虾品质的破坏差异较小。各实验组中,SMF-80组和SMF-0组之间存在显著性差异,表明磁场能够有效改善冻结过程对肌原纤维蛋白致密网络的损伤。冷冻导致肌原纤维蛋白变性,从而改变水合作用,导致水的迁移率升高,一部分固定水转化为自由水,甚至在解冻过程中损失。各实验组之间的自由水含量并无显著性差异,但SMF-80组和SMF-0组之间总水分含量存在显著性差异,这表明磁场能够有效改善样品水分迁移。



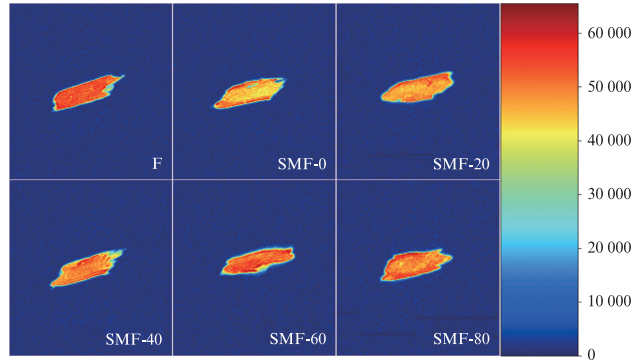
(a) 低场核磁共振典型曲线
Typical curves for LF-NMR



(b) 含水量数值分析
Numerical analysis of water content



(c) 含水量百分比分析
Percentage analysis of water content



(d) 核磁成像分析
The analysis of MRI image

不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图5 不同磁场强度处理后样品水分分布的分析
Fig. 5 Analysis of moisture distribution in samples treated with different magnetic field strengths

图5d中核磁成像(MRI)直观地展示了样品中的水分含量,通过伪彩软件处理,得出以下图像,其中颜色越深,表明样品在此处的水分含量更大,观察图像可知,新鲜样品的水分含量最高,

且分布均匀,四周水分没有明显下降,而冻结后的样品,周边皆有不同程度的水分损失,其中SMF-0组水分下降最为明显,与其他组具有明显区别,而SMF-60和SMF-80组水分损失最少,图

像与新鲜组最为接近。HU等^[24]研究了电磁场联合冻结技术对猪肉冷冻品质的影响,发现施加磁场后,样品品质具有显著性改善。

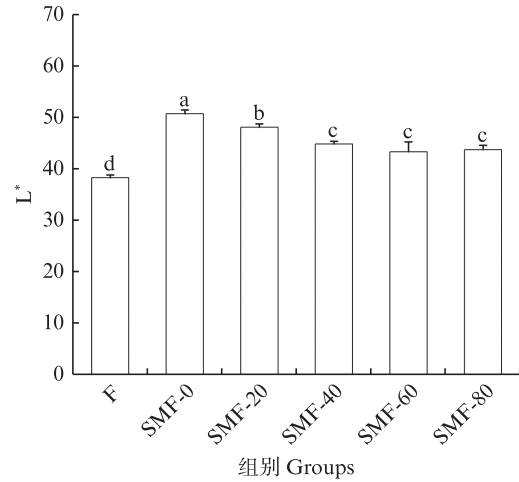
2.3 理化性质

2.3.1 色差分析

冷冻破坏了肌肉组织的结构,解冻后流出的部分自由水被吸收,导致L*值的增加^[25]。表征明度的L*的变化可以作为样品质量的参考。由图6可知,与新鲜对照组相比,所有实验组的L*值都有所增加。其中,SMF-0组的L*值最大,且与其他组之间存在显著性差异,表明在冻结过程中,冰晶生长对肌肉组织的影响较大,部分固定水转变成自由水,提高了虾肉的明度。SMF-80组的L*值最小,表明在所测实验组中,80Gs的静磁场强度最适宜竹节虾,对虾肉的破坏最小。随着磁场强度的增大,L*逐渐降低,接近新鲜样品。JIANG等^[28]研究了磁场解冻方法对冷冻牛肉的影响,发现随着磁场强度的增加,L*逐渐减小,表明磁场能够有效降低解冻过程样品中的水分损失。全潇洋等^[29]在研究不同解冻方式对金枪鱼品质特性的影响时也发现静电场能有效减小样品的色度。

2.3.2 DSC分析

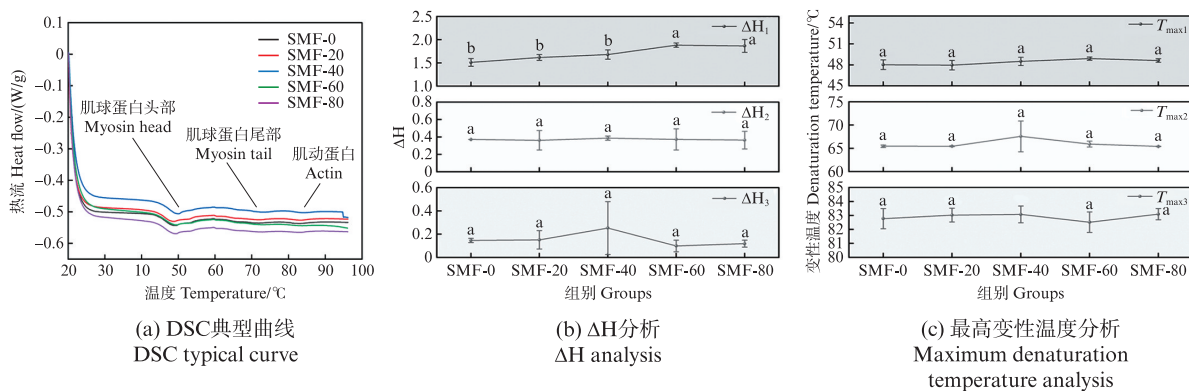
冷冻将改变蛋白质的结构及其耐热的能力。不同冷冻处理后差示扫描量热法(DSC)扫描的典型曲线如图7a所示,第一个峰 T_{max1} (45~50°C)对应于肌球蛋白头部的最高变性温度, T_{max2} (60~65°C)对应于肌球蛋白尾部最高变性温度^[30]。转变温度(T_{max})和焓(ΔH)的变化是蛋白质结构稳定性的直接指标。



不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图6 不同磁场强度处理后样品色差分析
Fig. 6 Color difference analysis of samples treated with different magnetic field strengths

3种蛋白质的变性焓值如图7b所示,随着磁场强度的增强, ΔH_1 不断增强,SMF-0和SMF-60和SMF-80存在显著性差异,表明磁场能够增强竹节虾蛋白质热稳定性,TAN等认为冷冻过程中,冰晶的形成使蛋白质的二级结构被破坏,蛋白质热稳定性下降。而磁场能够有效减小冰晶的尺寸,减少对肌肉结构的损伤。各组 ΔH_2 和 ΔH_3 无显著性差异,表明磁场辅助冻结无法显著改善尾部肌动蛋白和肌球蛋白的热稳定性。3种蛋白质的最高变性温度如图7c所示,随着磁场强度的增强, T_{max} 不断增大,但各组之间不存在显著性差异,表明磁场辅助冷冻对蛋白质的最高变性温度影响不大。



不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

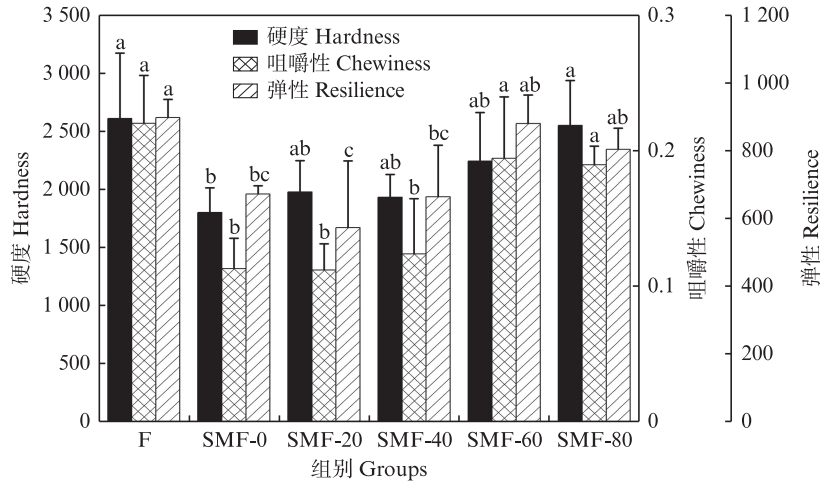
图7 不同磁场强度处理后样品蛋白质热稳定性分析

Fig. 7 Analysis of protein thermal stability of samples after treatment with different magnetic field strengths

2.3.3 质构分析

食品的质构特性在食品质量中起着至关重要的作用,对应着销售过程中,消费者的触感,是决定消费者对产品接受程度的重要指标之一^[31]。硬度主要与肌肉组织完整性和蛋白质结构稳定性有关。由图8可以看出,冷冻导致硬度降低,这可能是由于冷冻过程中冰晶形成和生长导致肌原纤维部分变性而导致的聚集和水分损失。YUAN等^[32]认为肌肉中肌纤维含量和结缔组织强度是导致肌肉质地特性变化的主要成分。随

着磁场强度的增加,磁场对于冻结质量的提升越明显。相对于SMF-0组,80Gs静磁场显著保存了样品的硬度。咀嚼性是食品质地分析中的一个重要参数,它描述了食品在咀嚼过程中的质感和口感,直接关系到食品的口感和食用体验。样品咀嚼性在低强度磁场中改善作用不明显,静磁场强度超过60Gs后出现显著性差异。样品弹性的变化趋势与咀嚼性相近,所有实验组中SMF-80组的硬度和弹性最高。



不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图8 不同磁场强度处理后样品硬度、咀嚼性和弹性的分析
Fig. 8 Results of hardness, chewability and resilience of samples after treatment with different magnetic field strengths

3 结论

此研究建立了一种基于冲击式速冻机的静磁场辅助冷冻系统,旨在提升冷冻品质,减小冻结过程对竹节虾品质的不利影响。结果表明:

(1)施加磁场缩短了相变时间,磁场强度越大,相变时间越短。其中SMF-80的相变时间最短,相较于SMF-0组减小了55.6%。

(2)静磁场辅助冻结技术减小了解冻、蒸煮和离心过程中的水分流失,SMF-80组的离心损失和蒸煮损失和新鲜组并无显著性差异,表明静磁场对于减小冰晶对微观结构的破坏,减小水分流失有积极意义。核磁共振分析和核磁成像分析表明随着静磁场强度增大,含水量变大,SMF-80在所有实验组中水分含量最高,且自由水含量少,静磁场显著抑制了固定水和自由水的迁移和

损失。

(3)静磁场抑制了虾样品L*值的增加,表明静磁场提升了冷冻样品的保水能力,减小了自由水的迁移。DSC分析显示水产品蛋白质热稳定性增加,表明磁场能够有效减小冰晶对肌肉结构的损伤。静磁场还显著改善了冻融过后竹节虾的硬度、咀嚼性和弹性,提升了竹节虾的口感。

综上,静磁场辅助冻结系统能够有效加快竹节虾的冻结速率,提升冷冻竹节虾的品质,并且在冻结过程中与样品不会接触,也无须添加化学试剂,更容易被消费者所接受,保证冻品的食用价值。但是静磁场辅助冻结系统仍然存在一定的不足:现有直流电源无法进一步增大磁场强度,无法研究更高强度磁场对于冻结质量的影响,未能测得竹节虾的最适宜静磁场强度;设备未能实现工业化和智能化,各部分均需独立操

作,未能整合为一台能够系统控制并运转的装置;未能对磁场辅助冻结的机理进行更深一步的研究。将会在后续的研究中考虑并解决以上问题。

作者声明本文无利益冲突

参考文献:

- [1] KENNEDY G, AHERN M B, IANNOTTI L L, et al. Considering the food environment can help to promote the consumption of aquatic foods for healthy diets [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1241548.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
The Bureau of Fisheries and Fishery Administration, The Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *China fishery statistical yearbook* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.
- [3] WANG X D, XIE C, LIANG R P, et al. Effect of low voltage electrostatic field treatment on the quality of *Penaeus japonicus* during microfreezing storage [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 4(7): 1-6, 12.
- [4] BIAN C H, CHENG H, YU H J, et al. Effect of multi-frequency ultrasound assisted thawing on the quality of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105907.
- [5] WANG Y, MIYAZAKI R, SAITOU S, et al. The effect of ice crystals formations on the flesh quality of frozen horse mackerel (*Trachurus japonicus*) [J]. *Journal of Texture Studies*, 2018, 49(5): 485-491.
- [6] LENG D M, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. Static magnetic field assisted freezing of four kinds of fruits and vegetables: micro and macro effects [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 146: 118-125.
- [7] LU N, MA J, SUN D W. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: mechanisms, techniques and applications [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 124: 63-85.
- [8] EL MAY A, SNOUSSI S, BEN MILOUD N, et al. Effects of static magnetic field on cell growth, viability, and differential gene expression in *Salmonella* [J]. *Foodborne Pathogens and Disease*, 2009, 6(5): 547-552.
- [9] DALVI-ISFAHAN M, HAMDAMI N, XANTHAKIS E, et al. Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 195: 222-234.
- [10] CHANG K T, WENG C I. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(4): 043917.
- [11] RODRÍGUEZ A C, JAMES C, JAMES S J. Effects of weak oscillating magnetic fields on the freezing of pork loin [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(9): 1615-1621.
- [12] JAMES C, REITZ B, JAMES S J. The freezing characteristics of garlic bulbs (*Allium sativum* L.) frozen conventionally or with the assistance of an oscillating weak magnetic field [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(3): 702-708.
- [13] PURNELL G, JAMES C, JAMES S J. The effects of applying oscillating magnetic fields during the freezing of apple and potato [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(12): 2113-2122.
- [14] KIM Y B, WOO S M, JEONG J Y, et al. Temperature changes during freezing and effect of physicochemical properties after thawing on meat by air blast and magnetic resonance quick freezing [J]. *Food Science of Animal Resources*, 2013, 33(6): 763-771.
- [15] LENG D M, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. The effect of magnetic field on the quality of channel catfish under two different freezing temperatures [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 140: 49-56.
- [16] TANG J Y, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 278: 109949.
- [17] PEITING Y, KAIXUAN L, AIGUO F, et al. Magnetic field improves the quality of frozen tilapia fillets by decreasing the ice crystals during freezing process [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2024, 59(12): 8961-8971.
- [18] STORMO S K, SKÅRA T. Liquid loss in thawed cod-Deconvoluting the effects of freezing-rate, freezing cycles, frozen storage time, and thawing-rate through a full factorial design [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(6): e13691.
- [19] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review [J]. *Meat Science*, 2012, 91(2): 93-98.
- [20] KAUR M, KUMAR M, SETHI V. Maintaining the freeze thawing characteristics of tomato through development and evaluation of magnetic field-assisted freezing system [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(9): e16900.
- [21] SOLO-DE-ZALDÍVAR B, HERRANZ B, BORDERÍAS

- A J, et al. Effect of freezing and frozen storage on restructured FISH prototypes made with glucomannan and FISH mince [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41: 233-240.
- [22] LI S J, MA R C, PAN J F, et al. Combined effects of aging and low temperature, long time heating on pork toughness[J]. *Meat Science*, 2019, 150: 33-39.
- [23] WANG C, WANG H, LI X, et al. Effects of oxygen concentration in modified atmosphere packaging on water holding capacity of pork steaks[J]. *Meat Science*, 2019, 148: 189-197.
- [24] HU R, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Novel assistive technologies for efficient freezing of pork based on high voltage electric field and static magnetic field: a comparative study [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 80: 103087.
- [25] SUN Q X, ZHAO X X, ZHANG C, et al. Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels [J]. *LWT*, 2019, 108: 106-112.
- [26] SUN Q X, SUN F D, XIA X F, et al. The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp (*Cyprinus carpio*) during freezing storage [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 281-291.
- [27] CARNEIRO C D S, MÁRSICO E T, DE OLIVEIRA RESENDE RIBEIRO R, et al. Studies of the effect of sodium tripolyphosphate on frozen shrimp by physicochemical analytical methods and Low Field Nuclear Magnetic Resonance (LF¹H NMR) [J]. *LWT*, 2013, 50(2): 401-407.
- [28] JIANG J B, ZHANG L Y, YAO J B, et al. Effect of static magnetic field assisted thawing on physicochemical quality and microstructure of frozen beef tenderloin [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 914373.
- [29] 全潇洋, 张怡, 刘宝林, 等. 不同解冻方式对金枪鱼品质特性的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(5): 1283-1291.
- TONG X Y, ZHANG Y, LIU B L, et al. Effect of different thawing methods on the quality characteristics of tuna[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(5): 1283-1291.
- [30] LAN W Q, ZHAO Y N, HU X Y, et al. Effects of carrageenan oligosaccharide on lipid, protein oxidative changes, and moisture migration of *Litopenaeus vannamei* during freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): e14675.
- [31] LIANG Y, QU Z T, LIU M, et al. Effect of curdlan on the quality of frozen-cooked noodles during frozen storage [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 95: 103019.
- [32] YUAN G F, LV H, TANG W Y, et al. Effect of chitosan coating combined with pomegranate peel extract on the quality of Pacific white shrimp during iced storage [J]. *Food Control*, 2016, 59: 818-823.

Effect of static magnetic field-assisted freezing on the quality of frozen *Penaeus japonicus*

DING Guoqing^{1,2,3}, YANG Dazhang^{1,2,3}, XIE Jing^{1,2,4}, MEI Jun^{1,2,3}

(1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Testing Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai 201306, China; 4. Quality Supervision, Inspection and Testing Center for Cold Storage and Refrigeration Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306, China)

Abstract: Freezing is a common method of food preservation, but the traditional freezing method causes the formation of a large number of irregular ice crystals, which affects the taste and nutritional value of aquatic products. In this study, a static magnetic field-assisted freezing system based on an impact freezer was established to improve the freezing quality and reduce the adverse effects of freezing on aquatic products. The effects of static magnetic fields with different intensities (20 Gs, 40 Gs, 60 Gs, and 80 Gs) on the moisture distribution and physicochemical properties of frozen *Penaeus japonicus* were investigated. The results showed that the static magnetic field-assisted freezing technique shortened the phase transition time, and the higher the magnetic field intensity, the shorter the phase transition time. In terms of moisture distribution, the magnetic field-assisted freezing technique significantly reduced the thawing loss, cooking loss, and centrifugal loss. Among them, the cooking loss and centrifugal loss of the SMF-80 group were not significantly different from those of the fresh group, indicating that the magnetic field-assisted freezing can effectively reduce moisture loss of *Penaeus japonicus*. LF-NMR showed that the static magnetic field reduced the mobility and loss of fixed and free water. In addition, the static magnetic field accelerated the freezing rate and suppressed the increase of L* value in shrimp samples, and the DSC analysis showed that the thermal stability of *Penaeus japonicus* proteins increased, indicating that the application of static magnetic field could reduce the damage to the protein structure. The static magnetic field also significantly improved the hardness, chewiness and resilience of *Penaeus japonicus* after freezing and thawing, and enhanced the texture of *Penaeus japonicus*. In conclusion, the static magnetic field-assisted freezing system effectively improved the quality of frozen *Penaeus japonicus* and minimized the adverse effects of freezing on the nutritional value of *Penaeus japonicus*.

Key words: *Penaeus japonicus*; static magnetic field; freezing curve; water holding capacity; water distribution