

速冻中华绒螯蟹冻藏过程中的水分迁移规律及其对肌肉品质的影响研究

艾馨, 房泽萍, 郝一帆, 杨俊豪, 杨立娟, 付源, 孙玉玺, 卓浩然, 杨水兵*

滁州学院现代农业与食品工程学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月7日; 发布日期: 2026年9月18日

摘要

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)因其独特风味与丰富营养而备受消费者青睐。然而, 其生产受季节性和地域性限制, 如何有效保藏已成为产业发展的关键问题。速冻技术能够迅速降低温度, 抑制微生物繁殖与酶活性, 从而延长货架期并扩大销售范围, 是突破上述局限的重要手段。文章聚焦于中华绒螯蟹在速冻过程中的水分迁移特性及其对品质的影响, 系统探讨水分迁移对蟹肉口感、风味、营养成分及微观结构等品质的作用机制, 如导致口感变差、风味改变、蛋白质变性、营养流失以及微观结构受损等。此外, 还探讨了目前研究中存在的问题以及未来的研究方向, 旨在为提高速冻中华绒螯蟹的品质和延长其货架期提供理论依据。

关键词

中华绒螯蟹, 冷冻, 水分迁移, 质构特性, 冰晶生长

Study on the Water Migration Patterns of Quick-Frozen *Eriocheir sinensis* during Frozen Storage and Their Effects on Muscle Quality

Xin Ai, Zeping Fang, Yifan Hao, Junhao Yang, Lijuan Yang, Yuan Fu, Yuxi Sun, Haoran Zhuo, Shuibing Yang*

School of Modern Agriculture and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: August 11, 2026; accepted: September 7, 2026; published: September 18, 2026

*通讯作者。

文章引用: 艾馨, 房泽萍, 郝一帆, 杨俊豪, 杨立娟, 付源, 孙玉玺, 卓浩然, 杨水兵. 速冻中华绒螯蟹冻藏过程中的水分迁移规律及其对肌肉品质的影响研究[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(5): 600-607. DOI: 10.12677/hjfn.2026.155063

Abstract

Eriocheir sinensis is favored by consumers owing to its distinctive flavor and abundant nutrients. Nevertheless, its production is restricted by seasonality and geographical conditions, and effective preservation has become a critical issue for industrial development. Quick-freezing technology serves as a vital approach to overcome these limitations. It can rapidly lower temperature, inhibit microbial proliferation and enzyme activity, extend shelf life, and broaden marketing scope. This review focuses on the water migration characteristics of *Eriocheir sinensis* during quick-freezing and their impacts on quality. The mechanisms underlying the effects of water migration on multiple quality attributes of crab meat, including texture, flavor, nutritional composition, and microstructure, are comprehensively discussed. Water migration may trigger undesirable texture deterioration, flavor variation, protein denaturation, nutrient loss, and microstructure damage. Furthermore, existing challenges in current research and prospective research directions are summarized, aiming to provide theoretical support for improving the quality and extending the shelf life of quick-frozen *Eriocheir sinensis*.

Keywords

Eriocheir sinensis, Freezing, Water Migration, Texture Property, Ice Crystal Growth

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中华绒螯蟹作为我国著名的水产珍品，在水产市场中占据着举足轻重的地位，是我国重要的淡水养殖种类[1]。其鲜美的肉质、丰富的营养成分以及独特的风味使其成为众多消费者餐桌上的佳肴，在国内外市场均享有极高的声誉。然而，中华绒螯蟹的生产具有季节性和地域性特征，其生长繁殖受到制约，导致供需矛盾突出，限制市场拓展与消费者享用。目前，冷冻是水产品主要的贮藏方式[2]。其中，低温速冻技术成为应对上述问题的重要策略：低温可降低酶活力，抑制微生物生长繁殖；同时，还能减缓其他理化反应的反应速率[3]。但在速冻过程中，蟹体内水分会发生迁移，且极易受到冰晶的机械损伤，导致其持水力下降、蛋白质变性、解冻后汁液流失等品质劣化。由此可见，中华绒螯蟹的保鲜方法与保藏技术亟待进一步优化与提升[4]。因此，深入探究其水分迁移特性与品质影响，对优化速冻工艺、推动产业发展至关重要。

2. 中华绒螯蟹概述

中华绒螯蟹(河蟹、大闸蟹)，是常见的甲壳类动物，隶属于方蟹科、绒螯蟹属[5]。其原产于亚洲东海岸的淡水和河口栖息地，一般在江、河、湖荡穴居，通常夜间出没，以谷物和动物尸体为食，是偏爱动物性食物的杂食蟹类之一。我国中华绒螯蟹年总产量维持在 80 万吨左右，其中安徽、江苏、湖北、辽宁、江西和山东等六省在大闸蟹总产量中的占比保持在 93%左右。中华绒螯蟹产业已成为农民脱贫致富的重要支柱。大力发展该产业，不仅有助于拓宽农村就业创业渠道，促进乡村产业转型升级，更能充分发挥其作为地方特色支柱产业的核心带动作用[6]。此外，中华绒螯蟹富含蛋白质、多不饱和脂肪酸和碳水化合物，以及钙、磷、钾、钠、镁、硒等微量元素，营养价值远高于许多水产品[7]，因此深受广大消费者喜爱，是我国特有的水产珍品，具有很高的经济价值。目前，除鲜活销售外，其产品主要以冷冻初加工

品和低温熟食制品的形式销售。

3. 速冻中华绒螯蟹冻藏过程中的水分迁移规律

3.1. 水分的存在形式及初始分布

基于低场核磁共振技术,新鲜中华绒螯蟹肌肉中的水分按其横向弛豫时间的差异主要分为结合水、固定化水和自由水[8]。结合水与蛋白质等大分子物质紧密结合,含量相对稳定;固定化水是肌肉中水分的主要存在形式,存在于肌原纤维和肌浆网等组织间隙中;自由水则流动性较大,指存在于肌肉细胞外能自由流动的水,占总水分的10%~15% [9],主要存在于细胞外间隙。初始状态下,水分在肌肉组织中的分布较为均匀,但不同部位的水分含量和存在形式可能存在一定差异。

3.2. 冻结方式对水分迁移的调控作用

冻结方式是决定水产品冻藏品质的关键。水产品水分含量高、组织柔嫩、蛋白质活性强,在低温加工与贮藏过程中极易发生品质劣变。长期以来,水产品加工领域多采用常规冻结技术(如空气鼓风冻结、接触式冻结)完成保鲜贮藏,但普遍存在冻结速率慢、温度分布不均等问题,冻结过程中形成的冰晶尺寸大且分布不均匀,易造成肌肉细胞不可逆的机械损伤,导致蛋白质变性、肉质松散、汁液流失等品质劣变,难以满足高品质水产品的保鲜加工需求。

速冻技术可使产品快速通过最大冰晶生成带,促使肌肉内部形成细小且均匀的冰晶,从而降低对组织结构的破坏程度,减少解冻后的汁液流失[10]。然而,传统速冻方式存在能耗高、设备投入大等局限。近年来,随着物理场辅助冻结技术(如磁场、高压静电场、超声波辅助冻结等)的发展,为从源头精准调控冰晶形态、减少水分迁移提供了新的技术路径。该技术通过外场作用影响冰晶成核与生长过程,在改善水产品冻藏品质方面展现出良好的应用前景。Zhou 等[11]报道了静磁场辅助浸渍冻结可使金鲳鱼在冻藏180天后不易流动水含量较常规浸渍冻结提高1.25%,表明磁场辅助冻结能有效抑制冻藏期间固定水向自由水的转化,从而减缓水分迁移引发的品质劣变。

冻结方式的选择直接影响冰晶的形态、尺寸与分布,进而决定冻藏过程中水分迁移的程度与路径。合理的冻结工艺设计是后续冻藏品质调控的重要前提。

3.3. 冻藏过程中水分迁移的机制

3.3.1. 冰晶生长

冻藏具有风味保持较好、更安全高效、储备时间长等优势,被公认为是食品长期保藏的最佳方法[12]。随着科学的进步与发展,人们逐渐认识到,食品的质量和风味在很大程度上取决于冰晶的组织结构和生长特点[13]。在冻藏过程中,随着温度降低,蟹肉中的水分开始形成冰晶,而冰晶的生长是导致水分迁移的重要原因之一。初始形成的冰晶作为晶核,在低温下不断吸收周围水分而逐渐长大。冰晶的形状和大小对冷冻食品品质的优劣具有很大影响[13]。在冻结过程中,冰晶的生长会破坏肌肉细胞结构,导致细胞内水分外流并引起水分的重新分布。研究表明,冰晶越细小,产品的解冻失水量越少,肉质的色泽与质感也越佳[14];反之,大冰晶的形成会对肌肉组织造成严重的机械损伤,进而加剧水分的迁移与流失。

3.3.2. 溶质浓缩

随着水分不断结晶形成冰晶,位于细胞间隙的自由水首先结成冰,此时位于冰晶附近的溶液浓度增加,细胞间隙的渗透压增大[15],形成明显的浓度梯度。这种浓度梯度成为水分迁移的重要驱动力,促使水分从溶质浓度低的区域向溶质浓度高的区域迁移,以达到热力学上的浓度平衡状态。在中华绒螯蟹冻藏过程中,肌肉细胞内的溶质浓缩现象尤为明显。其细胞内含有多种无机盐、糖类、氨基酸等溶质,当

水分结晶析出后, 这些溶质在细胞内的浓度急剧升高, 与细胞外的低浓度溶液形成显著的浓度差。

在渗透压的推动以及冰晶的挤压作用下, 细胞内的水分不断迁移至细胞外, 细胞间隙的冰晶体积随之增大, 冰晶的膨胀进一步挤压细胞甚至导致细胞破裂[15]。同时, 溶质浓缩还会导致细胞内的渗透压发生变化, 进一步影响细胞的生理功能和水分平衡。高浓度的溶质环境可能会使蛋白质分子发生变性、聚集, 破坏其原有的结构和功能, 从而间接影响水分与蛋白质的结合能力, 加剧水分迁移对肌肉品质的负面影响。

3.3.3. 温度波动

冻藏过程中的温度波动也是影响水分迁移的重要因素。当温度升高时, 部分冰晶融化, 水分重新分布; 当温度再次降低时, 融化的水分又会重新结晶, 且可能形成新的冰晶核, 导致冰晶的不规则生长和水分的进一步迁移。田继源等的研究说明, 温度波动越小, 越能保持水产品的品质。因此, 在冻藏过程中应尽量控制贮藏环境的温度波动[16]。Zhang 等通过研究测定了温度波动过程中理化指标的变化, 其中持水力等指标均显著改变, 且温度波动使蛋白严重降解, 但这种劣化需经历 6 次及以上的温度波动才会显著[17]。

3.4. 水分迁移的检测方法

水分是水产品中含量最高且极重要的化学组分。水产品冷冻冻藏过程中水分含量、分布和存在状态的差异会对其风味、质地、稳定性及货架期产生显著影响[18]。在慢冻过程中, 冰晶首先在细胞膜外形成, 使细胞内水分不断向细胞膜外析出; 细胞膜外大冰晶的形成会对细胞造成挤压, 破坏细胞间的结合, 导致细胞分离、变形甚至细胞膜破裂, 从而造成机械损伤[19]。由于细胞内水分的不断析出, 使细胞质的浓度增大, 自由水变为半结合水。蛋白质分子中的-SH、-COO⁻、-NH₂等官能团可与水分子结合, 从而形成结合水。而在快速冻结过程中, 细胞膜内外的水同时形成大量均匀、微小的冰晶, 不会对细胞膜产生挤压使之变形破坏。因此, 解冻后, 蛋白质分子中的官能团能再度与水分子结合而形成结合水, 减少了液汁的流失, 保持了食品原有的色、香、味及营养成分。而当降温速度过快时, 细胞内溶液过冷度不断下降, 最终产生胞内冰晶, 造成对细胞膜的机械损伤[20][21], 导致液汁的流失增加。由此可见, 研究水分迁移规律对解决冷冻冻藏过程中的水产品质量损失有着十分重要的意义。

当前, 食品中水分分析的方法主要包括近红外光谱法、微波测定法、电阻率成像法、计算机断层成像法、核磁共振(NMR)法等。传统方法无法了解食品中水分的分布状态和流动性信息, 且在测定过程中, 加热等会导致一些物理、化学变化, 如蛋白质变性等, 不能准确反映水分结合特征[22]。水分的存在状态及其迁移变化可通过质子弛豫行为加以表征。NMR 技术能检测食品中不同存在状态水分的质子弛豫行为, 据此分析水分的流动性大小, 并可直观显示食品中水分及其迁移状态[23]。其中, 低场核磁共振(LF-NMR)在水产品研究中应用较为广泛, 不仅可解析样品水分含量、水分存在状态以及不同处理条件下水分流动特性, 还能够无损表征脂肪、蛋白质的变化, 间接反映水产品品质劣变情况, 具备良好的应用前景[24]。近年来, 组学技术的快速发展也为深入解析冻藏过程中水分迁移的分子机制提供了有力工具。Li 等[25]利用蛋白质组学技术分析了鳙鱼(*Hypophthalmichthys nobilis*)眼部肌肉和背部肌肉在冻藏期间持水能力(WHC)差异的分子机制, 通过差异表达蛋白的鉴定揭示了不同部位肌肉持水性差异的蛋白层面原因, 为理解冻藏过程中水分流失的分子基础提供了蛋白质组学证据。除此之外, 常用于检测速冻中华绒螯蟹冻藏过程中水分迁移的方法是差示扫描量热法(DSC), 其可以分析样品在加热或冷却过程中的热焓变化, 从而确定水分的冻结和融化特性, 间接了解水分迁移规律。

4. 水分迁移对水产品肌肉品质的影响

4.1. 对持水性的影响

水分迁移对速冻中华绒螯蟹肌肉持水性的影响极为显著。持水性是指肌肉保持自身水分和外加水

的能力,是衡量肌肉品质的重要指标之一。持水性下降可能归因于冻藏过程中冰晶的形成对肌原纤维结构造成的物理损伤和溶质浓度造成的化学损伤,从而导致水分发生迁移和汁液的流失[26],使肌肉的持水性呈现明显的下降趋势。

水分迁移首先破坏了肌肉细胞的完整性,使细胞内的水分大量外流。冰晶的生长和溶质浓缩造成细胞变形、破裂,细胞内的水分失去了原有的束缚结构,无法有效地被肌肉组织保留。同时,水分迁移引发的蛋白质变性改变了蛋白质分子的结构和电荷分布,减少了蛋白质与水分的结合位点,降低了蛋白质的亲水性。肌原纤维蛋白作为肌肉中主要的结构蛋白,其变性和聚集会导致肌原纤维之间的间隙增大,水分更容易流失。

持水性的降低不仅会造成蟹肉在解冻和烹饪过程中大量的汁液流失,影响产品的出品率和口感,还会使肌肉的质地变得干硬,失去原有的鲜嫩多汁特性。

4.2. 对嫩度的影响

水分迁移引起的肌肉结构破坏和蛋白质变性对嫩度影响重大。中华绒螯蟹肌纤维细短,在冻藏过程中冰晶易在肌纤维内部及间隙生成并发生重结晶,细短的肌纤维骨架更易被冰晶机械割裂,造成肌原纤维断裂、肌纤维小片化指数升高,肌纤维排列松散无序。肌原纤维蛋白伴随变性发生构象改变,肌肉持水能力下降,解冻汁液流失加剧[27];宏观质构上表现为硬度、弹性、咀嚼性显著降低,肉质软烂发渣。肌纤维结构破损还会促使胞内酶与底物充分接触,间接加速脂质与蛋白质降解,协同放大蟹肉整体品质劣变程度。研究表明,冻藏温度上升会加剧肌肉纤维结构模糊化、纤维尺寸减小及蛋白质网络清晰度下降[28]。此外,水分迁移还会导致肌肉中钙激活酶等蛋白酶活性改变,进一步影响肌肉的嫩度。这是因为钙激活酶活性的变化会影响肌肉中蛋白质的降解程度,从而影响嫩度。

4.3. 对色泽的影响

水分迁移会影响中华绒螯蟹肌肉的色泽。随着水分流失和肌肉结构变化,蟹肉的色泽会逐渐改变。新鲜的蟹肉呈现淡红色或灰白色,而在冻藏过程中,由于水分迁移导致肌肉组织的光散射特性改变,蟹肉的色泽会变得暗淡无光。同时,水分迁移还可能引发一些化学反应,如脂肪氧化等,产生的氧化产物会进一步影响蟹肉的色泽,使其出现泛黄或褐变现象[29]。且脂肪氧化产生的醛、酮类物质不仅影响色泽,还会带来不良气味。

4.4. 对风味的影响

水分迁移对速冻中华绒螯蟹的风味也有显著影响。水分流失会导致一些水溶性风味物质损失,同时水分迁移引发的蛋白质变性和脂肪氧化等反应会产生一些不良风味物质,改变蟹肉原有的鲜美风味,其中青草味、肉香味可短期内劣化,而脂香味、鱼腥味劣变则开始较晚,且鱼腥味为感官评价反馈的最敏感指标[30]。由于蟹肉中不饱和脂肪酸含量高,因此在低温条件下也会发生氧化,对产品品质和货架期产生负面影响[31]。冻藏过程中蟹肉自由水不断流失,组织间隙液浓度随之升高,进而加速脂肪氧化。脂肪氧化除生成醛、酮类等异味物质,造成蟹肉风味劣变外,还会产生脂质过氧化终产物丙二醛(MDA),而MDA含量越高,就代表脂肪氧化程度越深,样品酸败也越严重[32]。此外,水分迁移还可能影响肌肉中酶的活性,间接影响风味物质的代谢和生成。酶活性改变会影响风味前体物质的转化,从而改变最终的风味。

5. 冻藏过程中水分迁移与品质调控研究:局限与争议

目前,速冻中华绒螯蟹冻藏过程中水分迁移与肌肉品质的关联机制研究已取得一定进展,但一些

关键科学问题仍存在争议。学界普遍认可冰晶重结晶与肌原纤维蛋白构象改变共同驱动水分状态转化,自由水占比升高、结合水流失,进而引发汁液流失、质构劣变,但关于二者的主次贡献认识仍存在分歧。

5.1. 现有研究的主要争议

关于速冻中华绒螯蟹冻藏过程水分迁移的核心诱因,存在两种不同的观点。一种观点认为,冻藏过程中冰晶形成与重结晶造成的机械损伤是诱导蟹肉水分迁移及汁液流失的主导因素。该观点强调冰晶对肌肉组织的物理破坏不可逆性,且与冻藏温度波动幅度呈正相关。另一种观点则认为,中华绒螯蟹内源蛋白酶及 ATP 酶在低温冻藏环境中仍保留残余生物活性[33],可通过介导肌肉蛋白水解反应,破坏肌原纤维网络结构的完整性,进而加剧水分流失与品质劣变。然而,目前两种损伤途径的主次贡献尚不明确,低温下物理冰晶损伤与酶促生化损伤之间的耦合作用机制缺乏系统研究。

5.2. 当前研究存在的局限与待解决的问题

1) 现有冻藏水分迁移相关研究多基于恒定冻藏温度开展,与实际冷链流通环节普遍存在的温度波动工况不符。温度波动引发的冰晶反复重结晶机制,及其介导的多尺度水分迁移行为缺乏系统量化解析,更缺失可精准预测品质变化的动力学模型;2) 不同体质量、性腺发育阶段及养殖条件的中华绒螯蟹,其肌肉基础组分差异显著[34],但原料本底条件对冻藏期间水分迁移路径的调控机制,尚未见到充足的对比研究;3) 低场核磁技术虽可表征蟹肉水分分布状态(如结合水、不易流动水、自由水的比例变化),但水分迁移特征与肌肉感官、质构品质之间的定量映射关系仍未建立,无法通过水分指标精准预判速冻蟹食用品质,极大制约了速冻中华绒螯蟹专用品质控损预处理技术的研发与规模化落地应用。

6. 结语与展望

综上所述,速冻中华绒螯蟹在冻藏过程中,水分迁移现象普遍存在且受冰晶生长、溶质浓缩和温度波动等多种因素影响。水分迁移在持水性、嫩度、色泽和风味等方面对肌肉品质产生显著影响,致使产品品质下降。尽管目前在该领域已取得一定研究成果,明确了水分迁移规律及对肌肉品质的影响,但在研究的广度和深度上仍存在诸多不足。

未来研究可从多方面展开:在研究内容上,开展多因素交互作用对速冻中华绒螯蟹水分迁移和肌肉品质影响的研究,建立更完善的数学模型,准确预测水分迁移和品质变化规律;深入探究水分迁移与肌肉品质变化之间的分子机制,从蛋白质组学、代谢组学等层面揭示内在联系;加强对新型速冻技术的研究和应用,对比不同速冻技术对水分迁移和肌肉品质的影响,优化速冻工艺,开发更有效的保藏方法。在研究范围上,开展速冻中华绒螯蟹在冷链物流全过程中的水分迁移和品质变化研究,结合实际物流条件,制定合理的冷链控制策略,确保产品质量和安全。通过这些研究,为提高速冻中华绒螯蟹的品质和延长其货架期提供更坚实的理论基础和技术支持,推动中华绒螯蟹产业的健康发展。

基金项目

本研究受滁州学院大学生创新创业训练计划“中华绒螯蟹速冻过程中水分迁移规律及其对肌肉品质的影响研究”(No. 2025CXXL122)、滁州学院科研启动基金资助项目“低温冷冻中华绒螯蟹的水分迁移特性及其对品质的影响研究”(No. 2022qd49)的资助。

参考文献

[1] 尚明辉, 范陈伟, 赵金山, 等. 长江和黄河水系中华绒螯蟹扣蟹在黄河口成蟹阶段生长性能的比较[J]. 淡水渔业,

- 2023, 53(3): 79-86.
- [2] Nikoo, M., Benjakul, S. and Rahmanifarah, K. (2016) Hydrolysates from Marine Sources as Cryoprotective Substances in Seafoods and Seafood Products. *Trends in Food Science & Technology*, **57**, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.001>
- [3] 马诚仁, 欧帅. 水产品的品质影响因素及其保鲜技术研究进展[J]. 农产品加工, 2024(4): 97-102, 108.
- [4] 杨志坚. 液氮速冻对舌鳎和梭子蟹品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [5] 范陈伟, 姜晓东, 成永旭, 等. 中华绒螯蟹二龄早熟和晚熟品系选育第五代(G5)的生长性能和性腺发育评估[J]. 淡水渔业, 2022, 52(6): 92-101.
- [6] 徐淑亮. 江苏省兴化市大闸蟹产业发展研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [7] 邵雪梅, 陈明, 豆维胜, 等. 江苏不同湖域中华绒螯蟹的特征品质分析[J]. 食品科学, 2026, 47(2): 174-183.
- [8] Yu, D.W., Wu, L.Y., Regenstein, J.M., Jiang, Q., Yang, F., Xu, Y., *et al.* (2020) Recent Advances in Quality Retention of Non-Frozen Fish and Fishery Products: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **60**, 1747-1759. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1596067>
- [9] 张玉伟, 罗海玲, 贾慧娜, 等. 肌肉系水力的影响因素及其可能机制[J]. 动物营养学报, 2012(8): 1389-1396.
- [10] Zhang, Y. and Ertbjerg, P. (2019) On the Origin of Thaw Loss: Relationship between Freezing Rate and Protein Denaturation. *Food Chemistry*, **299**, Article ID: 125104. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125104>
- [11] Zhou, J., Sun, Q., Han, Z., Xiao, N., Wang, Z., Zheng, O., *et al.* (2025) The Impact of Static Magnetic Field-Assisted Immersion Freezing on the Structural and Functional Properties of Myofibrillar Proteins in Golden Pompano (*Trachinotus ovatus*) during Frozen Storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, **329**, Article ID: 147857. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147857>
- [12] 伍志权, 李唯正, 何鑫平, 等. 荔枝速冻保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(9): 206-212.
- [13] 苏格毅. 食品在冷冻过程中冰晶生长的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022.
- [14] 许子雄, 李保国, 罗权权. 速冻食品中冰晶的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(2): 63-67.
- [15] 劳梦甜, 曾璐瑶, 吴孟钊, 等. 冻结方式对黑斑蛙后腿肌肉持水性及肌原纤维蛋白结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 264-274.
- [16] 田继源, 杨永安, 吴子健. 冻藏期间温度波动对三文鱼品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 66-70.
- [17] Zhang, B., Cao, H., Wei, W. and Ying, X. (2020) Influence of Temperature Fluctuations on Growth and Recrystallization of Ice Crystals in Frozen Peeled Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Pre-Soaked with Carrageenan Oligosaccharide and Xylooligosaccharide. *Food Chemistry*, **306**, Article ID: 125641. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125641>
- [18] Gonçalves, A.A. and Ribeiro, J.L.D. (2009) Effects of Phosphate Treatment on Quality of Red Shrimp (*Pleoticus muelleri*) Processed with Cryomechanical Freezing. *LWT—Food Science and Technology*, **42**, 1435-1438. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.03.016>
- [19] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 北京机械工业出版社, 1999.
- [20] Su, G., Ramaswamy, H.S., Zhu, S., Yu, Y., Hu, F. and Xu, M. (2014) Thermal Characterization and Ice Crystal Analysis in Pressure Shift Freezing of Different Muscle (Shrimp and Porcine Liver) versus Conventional Freezing Method. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **26**, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.05.006>
- [21] 杨戈尔. 低温冷冻过程中胞内冰晶生长机制与应用研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [22] 陈成, 王晓曦, 王瑞, 等. 核磁共振技术在食品中水分迁移状况的研究现状[J]. 粮食与饲料工业, 2015(8): 5-8+13.
- [23] Mehta, N., Ahlawat, S.S., Sharma, D.P. and Dabur, R.S. (2015) Novel Trends in Development of Dietary Fiber Rich Meat Products—A Critical Review. *Journal of Food Science and Technology*, **52**, 633-647. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1010-2>
- [24] 段秀霞, 施文正, 汪之和. 低场核磁共振技术在水产品品质分析中的研究进展[J]. 渔业现代化, 2016, 43(5): 42-46.
- [25] Li, Q., Gao, S., Tan, Y., Hong, H. and Luo, Y. (2025) Proteomic Analysis and Biomarker Discovery of Water Holding Capacity Differences in Bighead Carp Eye and Dorsal Muscles during Frozen Storage. *Food Bioscience*, **63**, Article ID: 105518. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105518>
- [26] 尚珊, 王月月, 焦甜甜, 等. 不同抗冻剂对鲑鱼滑冻藏期间品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 388-396.
- [27] 孙颖琰, 高德梅, 许艳顺, 等. 复热方式对冻熟河蟹品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 18-24, 31.
- [28] 杨慧, 康克浪, 魏颖娟, 等. 不同温度液氮速冻对大鲵品质的影响[J]. 核农学报, 2025, 39(10): 2237-2245.
- [29] 尚佳宇, 徐祥, 徐大伦, 等. 解冻方式对炆蟹食用品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 192-198.

-
- [30] 郭学骞. 冷冻中华绒螯蟹肌肉特性及食用品质评价研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- [31] 陈丽娇, 李婷婷, 程文健. 超低温冷冻对水产品品质影响的研究进展[J]. 渔业现代化, 2020, 47(1): 69-75.
- [32] 邵俊杰, 朱昱璇, 黄鸿兵, 等. 不同冻结方式对中华绒螯蟹蟹肉品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 429-435.
- [33] 陈舜胜, 陈媛媛, 邱伟强, 等. 冻结和冻藏对中华绒螯蟹蟹肉品质的影响[J]. 水产学报, 2014(10): 1793-1799.
- [34] 解志龙, 姜晓东, 范陈伟, 等. 不同规格中华绒螯蟹成蟹的形态特征和组织系数比较[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(1): 67-76.