

# 电场辅助低温解冻对冷冻克氏原螯虾肌肉品质的影响研究

蒋一涵, 陈小青, 高余恒, 梁紫怡, 贾蝶君, 卢洪辉, 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3日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月14日

## 摘 要

克氏原螯虾作为我国重要的水产养殖品种, 因其肉质鲜嫩、营养丰富而深受消费者喜爱。冷冻贮藏是延长克氏原螯虾货架期的主要方式, 但传统解冻方法易导致虾肉出现水分流失、蛋白质变性、质构劣化及风味损失等品质问题。电场辅助低温解冻作为一种新型非热加工技术, 凭借其解冻效率高、品质保持好等优势, 在水产品加工领域展现出广阔应用前景。本文综述了电场辅助低温解冻技术的原理, 系统分析了该技术对冷冻水产品水分状态、蛋白质特性、质构品质等方面的影响, 并探讨了其作用机制, 最后指出了该技术在冷冻克氏原螯虾加工中存在的问题及未来研究方向, 旨在为高品质冷冻水产品解冻技术的研发与应用提供理论参考。

## 关键词

电场解冻, 低温解冻, 克氏原螯虾, 水分状态, 蛋白质特性

# Effect of Electric Field-Assisted Low-Temperature Thawing on Muscle Quality of Frozen *Procambarus clarkii*

Yihan Jiang, Xiaoqing Chen, Yuheng Gao, Ziyi Liang, Diejun Jia, Honghui Lu, Shuibing Yang\*

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

Received: August 3, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 14, 2026

## Abstract

As an important aquaculture species in China, *Procambarus clarkii* is widely favored by consumers

\*通讯作者。

文章引用: 蒋一涵, 陈小青, 高余恒, 梁紫怡, 贾蝶君, 卢洪辉, 杨水兵. 电场辅助低温解冻对冷冻克氏原螯虾肌肉品质的影响研究[J]. 海洋科学前沿, 2026, 13(3): 224-230. DOI: 10.12677/ams.2026.133029

for its tender flesh and rich nutrition. Frozen storage is the primary approach to extending the shelf life of *Procambarus clarkii*, however, conventional thawing methods tend to induce a series of quality deterioration in crayfish meat, including water loss, protein denaturation, texture degradation and flavor loss. As an emerging non-thermal processing technology, electric field-assisted low-temperature thawing has demonstrated broad application prospects in the aquatic product processing industry by virtue of its advantages such as high thawing efficiency and superior quality retention. This paper reviews the working principle of electric field-assisted low-temperature thawing technology, systematically analyzes the effects of this technology on the moisture state, protein characteristics, texture quality and other attributes of frozen aquatic products, and discusses its underlying mechanism. Finally, this paper outlines the existing challenges and future research directions of applying this technology in the processing of frozen *Procambarus clarkii*, aiming to provide theoretical reference for the research, development and application of high-quality thawing technologies for frozen aquatic products.

## Keywords

Electrical Field Thawing, Low-Temperature Thawing, *Procambarus clarkii*, Moisture State, Protein Characteristics

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

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)俗称小龙虾, 原产于北美, 自引入我国后因其适应性强、生长速度快、养殖效益高, 已发展成为我国重要的水产养殖品种[1]。据统计, 我国克氏原螯虾养殖产量已连续多年保持增长, 2023 年产量突破 300 万吨, 其中大部分用于加工冷冻产品。冷冻贮藏能有效抑制微生物生长繁殖和酶促反应, 延长克氏原螯虾的保质期, 但解冻作为冷冻食品加工和消费的关键环节, 其直接影响最终产品品质[2]。传统解冻方法主要包括空气解冻、静水解冻和冷藏室解冻等。空气解冻操作简便但效率低, 易导致表面干燥、氧化加剧; 静水解冻速度较快但水分流失严重, 易造成营养成分溶出; 冷藏室解冻品质保持较好但耗时过长, 不利于工业化生产[3]。这些传统方法均存在不同程度的缺陷, 导致冷冻克氏原螯虾肉在解冻过程中出现汁液流失率高、肉质柴硬、风味变淡等问题, 严重影响产品的商品价值和消费者体验[4]。为解决传统解冻方法的弊端, 新型解冻方法不断涌现, 其中电场辅助低温解冻技术因其独特优势受到广泛关注。该技术通过电场作用加速热量传递, 同时利用低温环境抑制微生物活动和生化反应, 实现快速解冻与品质保持的双重目标[5]。已有研究表明, 电场辅助低温解冻在罗非鱼、牛肉、猪肉等食品加工中能有效减少解冻损失、维持蛋白质稳定性和质构特性[6]。然而, 该技术在冷冻克氏原螯虾肉解冻中的应用研究尚处于起步阶段, 其对虾肉品质的影响规律及作用机制仍需系统探究。本文结合国内外相关研究进展, 从电场辅助低温解冻技术的原理出发, 全面分析其对冷冻水产品水分分布、蛋白质结构、质构特性等方面的影响, 探讨该技术在克氏原螯虾加工中的应用潜力与存在问题, 为推动冷冻水产品产业高质量发展提供技术支撑。

## 2. 电场辅助低温解冻技术的原理

电场辅助低温解冻技术是基于电场的热效应和非热效应实现的。其热效应主要通过两种方式产生: 离子在电场作用下发生定向迁移和碰撞, 产生焦耳热; 极性分子(如水分子)在交变电场中快速取向极化,

引发分子间摩擦生热,从而实现冰晶的快速融化[7]。在低温条件下(通常为 0℃~4℃),该技术能在加速解冻过程的同时,避免局部温度过高导致的品质劣变[8]。电场作用可改变细胞膜电位,影响酶的活性和微生物代谢;同时能调控蛋白质分子的空间构象,减少蛋白质变性聚集;此外,电场还能促进水分与蛋白质等大分子的相互作用,提高持水能力[9]。这些效应共同作用,使电场辅助低温解冻在快速解冻的同时,有效维持食品的原有品质[10]。

### 3. 电场辅助低温解冻对冷冻水产品品质的影响

#### 3.1. 对水分状态的影响

水分是水产品的主要成分,占比约 75%~80%,其状态变化直接影响产品嫩度、多汁性和风味。冷冻过程中形成的冰晶会破坏组织细胞,解冻时若水分不能有效保留,将导致汁液流失和品质下降[11]。

解冻损失和蒸煮损失是衡量水产品水分保留能力的关键指标。传统静水解冻的罗非鱼片解冻损失率可达 10%~15%,而电场辅助低温解冻能显著降低这一数值。研究表明,4℃、电场强度 5 kV 条件下解冻冷冻罗非鱼片,解冻损失率可降至 5%~7%,蒸煮损失率较空气解冻降低 40%以上[12]。这一效果可能源于电场作用增强了蛋白质与水分结合能力,减少自由水流失,同时低温环境抑制了组织细胞进一步损伤[13]。

传统解冻过程中,不易流动水易转化为自由水流失,而电场辅助低温解冻能有效抑制这一转化。对罗非鱼的研究表明,电场辅助低温解冻组的不易流动水相对含量显著提高,自由水含量降低,水分迁移速率减慢。可能是由于电场调控了水分子运动状态,增强了水分子与肌原纤维蛋白之间的氢键结合,减少水分自由迁移[14]。

冷冻过程中形成的冰晶会对水产品细胞造成机械损伤,导致解冻时水分渗出。电场辅助低温解冻通过快速解冻减少冰晶再结晶,降低对细胞结构的破坏。扫描电镜观察结果显示,经电场辅助低温解冻的罗非鱼片肌纤维排列整齐,细胞间隙较小,而空气解冻组肌纤维断裂严重,细胞间隙明显增大[12]。细胞结构完整性是水分保留的重要保障,也是减少水分流失的核心原因[15]。

#### 3.2. 对蛋白质特性的影响

蛋白质溶解性是反映其变性程度的重要指标。冷冻水产品解冻过程中,肌原纤维蛋白溶解性会因变性而降低。研究表明,电场辅助低温解冻组的罗非鱼片肌原纤维蛋白溶解度较空气解冻组提高 15%~20%,较静水解冻组提高 8%~12%。因为电场非热效应抑制了蛋白质分子间二硫键的形成,减少疏水基团暴露,从而维持蛋白质可溶性[16]。

$\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性是衡量肌原纤维蛋白完整性的重要指标,冷冻解冻过程中其活性会逐渐下降。电场辅助低温解冻能有效保护  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性,4℃电场解冻组的罗非鱼  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性较冷藏室解冻组高 25%左右。同时,电场作用能抑制蛋白酶活性,减少蛋白质降解,维持肌肉组织完整性[17]。

电场辅助低温解冻能维持水产品蛋白质二级结构稳定性[18]。传统解冻过程中,蛋白质的  $\alpha$ -螺旋结构含量下降, $\beta$ -折叠结构含量上升,导致蛋白质变性聚集[19]。而电场辅助低温解冻组的罗非鱼  $\alpha$ -螺旋结构含量显著高于传统解冻组, $\beta$ -折叠结构含量较低,表明电场能抑制蛋白质二级结构改变[12]。荧光光谱分析显示,电场作用能减少蛋白质疏水基团暴露,维持其三级结构稳定性[20]。

#### 3.3. 对质构特性的影响

传统解冻的水产品硬度较高,口感偏柴,而电场辅助低温解冻能显著降低硬度。研究表明,4℃电场解冻组的罗非鱼片硬度较空气解冻组降低 30%~35%,接近新鲜样品水平[12]。可能是因为电场辅助解冻

减少了肌纤维断裂和收缩,维持了肌肉组织疏松结构[21]。电场辅助低温解冻组的罗非鱼弹性和内聚性均显著高于传统解冻组,其中弹性较静水解冻组提高 20%~25%,内聚性提高 15%~18% [12]。这可能与电场辅助解冻技术维持肌原纤维蛋白完整性和肌肉组织结构稳定的特性密切相关[15]。电场辅助低温解冻组的水产品咀嚼性显著优于传统解冻组,表现为咀嚼过程中所需能量适中,口感鲜嫩多汁[14]。对小黄鱼的研究表明,电场辅助低温解冻组的咀嚼性评分显著高于空气解冻和静水解冻组[14]。这一结果与该技术减少水分流失和蛋白质变性的特性一致[12]。

## 4. 技术的挑战与局限性

尽管电场辅助低温解冻在实验室研究中展现出显著的品质保持优势,但其从实验室走向工业化应用仍面临诸多技术瓶颈与经济约束。

### 4.1. 设备成本与能耗问题

电场辅助低温解冻系统的核心设备包括高压交流电源、电极阵列、绝缘防护腔体及低温制冷单元。其中,高压电源需满足稳定输出、频率可调及安全防护等多重要求,单台实验型设备造价通常在数万元至数十万元,高于传统空气解冻或静水解冻设施。现有微波、超声、射频、高压静电场等技术均因成本高或技术缺陷而影响产业化推广[3]。有研究表明,高压静电场具有设备简单、能耗低、无污染等特点[22]。高压静电场解冻技术在冷冻行业得到快速发展,其解冻速率快、时间短、营养损失少[23]。但电场系统存在能量损耗,且制冷系统需持续运行以抵消电场产热,综合能耗较高。电场解冻能耗优势依赖于参数优化与规模效应,通过电源效率提升、冷量回收及规模化摊薄成本是经济性改善的关键。

### 4.2. 加热均匀性问题

电场分布的均匀性是影响解冻品质一致性的关键因素。克氏原螯虾外形不规则、甲壳覆盖、头尾尺寸差异大,易产生“边缘效应”和“尖端效应”,导致虾头、虾尾过热甚至蛋白质变性;虾壳与肌肉介电特性差异进一步加剧了温度场不均。在没有周围介质的情况下,南美白对虾尾扇部在中心温度约-2.0℃时已被过度加热至 48.8℃,而压实碎冰介质下虾体内的热点与冷点温差仅 7.8℃[24],表明带壳不规则水产品加热均匀性是核心难题。射频解冻虽均匀性优于微波,但存在边角效应和热逃逸现象[14]。目前实验室多采用规则形状样品,针对带壳不规则物料的电场均匀性调控研究匮乏,电极构型与物料排布优化缺乏理论指导。

### 4.3. 规模化生产瓶颈

现有设备多为批次处理,单批次产能难以满足企业数吨/时的连续生产需求。连续化生产需解决物料输送与电极空间匹配、高压安全防护、批次稳定性等工程问题。以高压静电技术为例,其对电极配置和电压水平的严格要求限制了产业化推广[25];物理场加工技术整体面临工业化设备不完善、场条件精确控制难、成本高等共性瓶颈[26]。设备放大过程中,电场衰减、腔体谐振等物理效应进一步加剧。研究表明,实验室筛选出的较优工艺参数在工业化连续加工中的适用性往往受工程放大因素制约,样品装载量与几何布局变化、电极结构与间距调整均可能导致场强分布不均,进而影响解冻均匀性及品质一致性[27]。

### 4.4. 与其他新型解冻技术的对比

为更全面地评估电场辅助低温解冻的技术定位,将其与超声波解冻、微波解冻、交变磁场解冻等代表性解冻技术从解冻效率、品质保持、设备成本维度进行对比分析,结果如表 1 所示。

**Table 1.** Comparison of different thawing techniques  
**表 1.** 不同解冻技术的比较

| 解冻技术     | 解冻效率 | 品质保持                       | 设备成本 |
|----------|------|----------------------------|------|
| 电场辅助低温解冻 | 中等   | 汁液流失较低，减少氧化损失[28]          | 低    |
| 超声波解冻    | 快    | 汁液流失较低，良好地保留蛋白质结构[29] [30] | 中低   |
| 交变磁场辅助解冻 | 较快   | 汁液流失低[12] [31]             | 高    |
| 微波辅助解冻   | 极快   | 易局部过热，存在结构损失、脂肪氧化[32] [33] | 中    |

由表 1 可见，电场辅助低温解冻的核心优势在于品质保持，其在减少汁液流失、抑制蛋白质变性方面表现突出。超声波解冻效率较高，但空化效应可能对肌肉细胞造成微结构损伤，且设备噪声大、维护成本高。微波解冻效率极快，但存在局部过热效应。综合而言，电场辅助低温解冻在品质导向型产品中具有较强竞争力，但其产业化路径需在降低成本、提升均匀性和突破连续化技术方面持续发力。

### 5. 结论和展望

电场辅助低温解冻技术作为一种创新的物理场解冻方法，为改善传统解冻方式导致的品质劣变问题提供了新的思路。该技术的优势在于，通过电场作用从产品内部促进冰晶的固-液相变过程，有效抑制了冻结过程中已形成冰晶的重结晶现象，从而显著减轻对肌肉细胞结构的机械性损伤。同时，特定电场模式还可能通过非热效应，对蛋白质等生物大分子的水合层结构与构象稳定性产生积极调控，进而在微观层面协同维持了肌原纤维骨架的完整性与蛋白溶解性等功能特性。然而，推动该技术从实验室研究走向规模化产业应用，仍需克服若干重要挑战。首要挑战在于其作用机理，特别是高压静电场(HVEF)的非热效应，目前仍缺乏直接的分子水平证据。其次，工艺参数的优化是一个复杂的系统工程，电场模式、强度、频率等变量与解冻物料的种类、形态及初始状态间存在复杂的非线性耦合关系。此外，对于外形不规则的带壳水产品(如克氏原螯虾)，电场在腔体内的空间分布均匀性及研究对象不同部位的能量吸收差异，直接导致解冻终点不一致，这已成为制约设备放大设计的核心工程瓶颈。

针对上述瓶颈，未来研究不应停留在“证明有效”的层面，而应向“为何有效、如何控效、何以放大”纵深推进。展望后续发展，建议重点聚焦以下三个方向：

(1) 电场非热效应的分子机制解构。当前关于电场作用的解释多停留于“抑制重结晶”的宏观层面，但电场究竟通过何种途径影响冰晶成核与生长动力学，以及非热效应在蛋白构象维持中的作用，尚缺乏清晰的理论框架。后续研究应整合分子动力学模拟与光谱学技术手段，探索电场强度与频率对水分子氢键网络及蛋白结合水层的影响规律，从分子尺度建立电场参数与冰晶形态、蛋白结构稳定性之间的关联。

(2) 多物理场协同解冻方法的探索。单一电场技术在穿透深度、热效应与均匀性之间往往存在不能兼顾的问题，单纯依靠参数优化难以实现突破。未来应系统评估电场与超声、射频、磁场等物理场的组合策略，明确不同物理场在解冻过程中的功能互补性。通过探索多场耦合的作用边界与协同条件，形成增效解冻方案。

(3) 面向产业化的智能解冻装备研发。实验室规模的批次解冻与工业化连续生产之间存在显著的差异，电极构型的设计、物料的连续化传输方式、在线质量监测手段等均需重新评估。后续研究应发展具备空间电场自适应调控能力的解冻系统，实现对物料状态的实时感知与闭环控制，从而在保证解冻均匀性的前提下提升批次处理能力。

综上所述，电场辅助低温解冻技术顺应食品加工领域向高效、低耗、优质转型的发展趋势。尽管从基础理论到工程化应用尚存许多障碍，但该技术有望在解决高附加值水产品冷链加工品质保持难题上发

挥关键的作用，其科学价值与产业转化前景均值得期待。

## 基金项目

本研究得到滁州学院大学生创新创业训练计划“物理场辅助解冻技术对克氏原螯虾肉品质影响研究”(No. 2025cxx1134)、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] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 126-130.
- [2] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 215-221+236.
- [3] 田金钊, 刘莹, 臧梁. 不同解冻方式对水产品品质影响研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 204-210.
- [4] 郑静静, 徐晨, 张敏. 不同解冻方式对熟制小龙虾理化特性的比较分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 356-362.
- [5] 巫宇航, 陈健, 李汴生. 物理场解冻在食品领域中的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 328-336.
- [6] 唐梦, 龚吉军, 叶明强. 高压静电解冻对冻罗非鱼片品质影响及其机理的研究[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 123-130.
- [7] 芮李彤, 刘畅, 夏秀芳. 水-冰动态变化引起冷冻肉类食品品质变化机理及控制技术研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 187-196.
- [8] 黄永赞, 张陈晨, 李双. 冷冻鱼快速解冻关键技术研究[J]. 食品与机械, 2022, 38(7): 218-223.
- [9] 甄火, 苏格毅, 张雪. 静电场对冷冻食品冰晶生长影响的相场法模拟[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 143-147.
- [10] 甘孙龙. 基于微冻液辅助电/磁场的生鲜肉冷冻/解冻品质提升的研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [11] 李娅迪, 朱军莉, 励建荣. 冷冻、解冻和包装方式对河鲈鱼片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 189-197.
- [12] 段婷. 浸渍速冻与电/磁场辅助解冻对罗非鱼片品质影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
- [13] 尚佳宇, 徐祥, 徐大伦. 解冻方式对炆蟹食用品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 192-198.
- [14] 何佳玲. 解冻方式对三文鱼品质影响及基于介电特性的品质预测[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [15] Liu, Y., Tan, Y., Luo, Y., *et al.* (2022) Evidence of Myofibrillar Protein Oxidation and Degradation Induced by Exudates during the Thawing Process of Bighead Carp Fillets. *Food Chemistry*, **383**, Article 132456.
- [16] 张家玮, 谢超, 余铭, 等. 低压静电场处理对带鱼微冻贮藏期间品质变化影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(23): 277-283.
- [17] Ekezie, F.G.C., Cheng, J.H. and Sun, D.W. (2021) Effects of Atmospheric Pressure Plasma on the Conformation and Physicochemical Properties of Myofibrillar Proteins from King Prawn (*Litopenaeus vannamei*). *Food Chemistry*, **347**, Article 138945.
- [18] Zhu, M., Xing, Y., Zhang, J., Li, H., Kang, Z., Ma, H., *et al.* (2023) Low-Frequency Alternating Magnetic Field Thawing of Frozen Pork Meat: Effects of Intensity on Quality Properties and Microstructure of Meat and Structure of Myofibrillar Proteins. *Meat Science*, **204**, Article 109241. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109241>
- [19] 尹蕾丽. 冷冻对鲍鱼肌肉质地的影响及其机理的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- [20] Zhuang, S., Liu, Y., Gao, S., Tan, Y., Hong, H. and Luo, Y. (2023) Mechanisms of Fish Protein Degradation Caused by Grass Carp Spoilage Bacteria: A Bottom-Up Exploration from the Molecular Level, Muscle Microstructure Level, to Related Quality Changes. *Food Chemistry*, **403**, Article 134309. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134309>
- [21] 刘欢, 马翼飞, 单钱艺. 冰藏和微冻贮藏对大鲈肌肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(23): 199-204.
- [22] 李一飞. 高压静电场对模型食品冷冻过程的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [23] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻技术在食品中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 373-376+385.
- [24] Zhang, Y., Chen, X., Liu, Y., Li, F., Tang, J., Shi, H., *et al.* (2024) Using Ice Surrounding to Improve Radio Frequency Tempering Uniformity of Bulk Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of Food Engineering*, **371**, Article 111967. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.111967>

- 
- [25] 臧芳波, 吕蒙, 付永杰, 等. 高压静电场解冻技术在肉类及肉制品中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 303-308.
- [26] 彭飞, 黄立俊, 张丽梅. 多物理场技术在预制菜加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 422-430.
- [27] 陈亮, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 高压静电场辅助解冻对草鱼品质及其肌原纤维蛋白的作用[J/OL]. 现代食品科技, 1-10. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.2.1908>, 2026-08-18.
- [28] 唐欣颖, 吉宏武, 张迪, 等. 高压静电场解冻对凡纳滨对虾肌球蛋白结构特征的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 177-184.
- [29] Wang, Y., Yan, J., Ding, Y. and Ma, H. (2022) Effects of Ultrasound on the Thawing of Quick-Frozen Small Yellow Croaker (*Larimichthys polyactis*) Based on TMT-Labeled Quantitative Proteomic. *Food Chemistry*, **366**, Article 130600. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130600>
- [30] Bian, C., Cheng, H., Yu, H., Mei, J. and Xie, J. (2022) Effect of Multi-Frequency Ultrasound Assisted Thawing on the Quality of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*). *Ultrasonics Sonochemistry*, **82**, Article 105907. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105907>
- [31] Mohsenpour, M., Nourani, M. and Enteshary, R. (2023) Effect of Thawing under an Alternating Magnetic Field on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Fillet Characteristics. *Food Chemistry*, **402**, Article 134255. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134255>
- [32] 马翼飞, 刘欢, 单钱艺, 等. 不同解冻方式对小黄鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 222-228.
- [33] 张文娣. 基于物化特性、空间效应及分子动力学模拟研究不同解冻方式对海鲈鱼品质的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.