

# 冷冻保护剂对克氏原螯虾品质的影响研究

陶齐林<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 刘飞<sup>2</sup>, 陈梦交<sup>1</sup>, 王宁<sup>1</sup>, 李嘉诚<sup>1</sup>, 王如峰<sup>3</sup>, 刘春玲<sup>3</sup>, 杨水兵<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>滁州学院生物与食品工程学院, 安徽 滁州

<sup>2</sup>安徽千颂食品科技有限公司, 安徽 滁州

<sup>3</sup>全椒县赤镇龙虾经济专业合作社, 安徽 滁州

收稿日期: 2024年2月21日; 录用日期: 2024年5月2日; 发布日期: 2024年5月13日

## 摘要

克氏原螯虾是我国重要的淡水水产资源, 其水分和蛋白质含量高, 因此极易受微生物感染而腐烂变质, 严重影响其品质。冷冻技术是一项传统的保鲜技术, 但冷冻会对克氏原螯虾品质造成不可逆转的伤害。添加冷冻保护剂是有效缓解水产品冷冻保藏过程中品质劣变的方法之一。本文简述了克氏原螯虾的保鲜技术及近年来应用较广的冷冻保护剂, 指出了冷冻保护剂在水产品加工领域的应用并进行展望, 旨在为冷冻水产品保鲜提供相应的理论依据。

## 关键词

克氏原螯虾, 冷冻, 保护剂, 品质

# Study on the Effect of Cryoprotectant on the Quality of Crayfish

Qilin Tao<sup>1</sup>, Xin Wang<sup>1</sup>, Fei Liu<sup>2</sup>, Mengjiao Chen<sup>1</sup>, Ning Wang<sup>1</sup>, Jiacheng Li<sup>1</sup>, Rufeng Wang<sup>3</sup>, Chunling Liu<sup>3</sup>, Shuibing Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Biotechnology and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

<sup>2</sup>Anhui Qiansong Food Technology Co., Ltd., Chuzhou Anhui

<sup>3</sup>Lobster Economic Cooperatives in Chizhen Town, Quanjiao County, Chuzhou Anhui

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2024; accepted: May 2<sup>nd</sup>, 2024; published: May 13<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Crayfish is an important freshwater aquatic resource in China, with high water and protein con-

\*通讯作者。

文章引用: 陶齐林, 王鑫, 刘飞, 陈梦交, 王宁, 李嘉诚, 王如峰, 刘春玲, 杨水兵. 冷冻保护剂对克氏原螯虾品质的影响研究[J]. 食品与营养科学, 2024, 13(2): 191-199. DOI: 10.12677/hjfn.2024.132024

tent, so it is very susceptible to microbial infection and decay, which seriously affects its quality. Freezing technology is a traditional preservation technology, but freezing will cause irreversible damage to the quality of crayfish. The addition of cryoprotectants is one of the effective ways to alleviate the quality deterioration of aquatic products in the process of freezing and preservation. In this paper, the preservation technology of crayfish and the cryoprotectants widely used in recent years are briefly described, and the application of cryoprotectants in the field of aquatic product processing is pointed out and prospected, aiming to provide a corresponding theoretical basis for the preservation of frozen aquatic products.

## Keywords

Crayfish, Freezing, Cryoprotectant, Quality

Copyright © 2024 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

近年来, 克氏原螯虾产业发展迅速, 养殖面积和产量大幅增加, 但是克氏原螯虾供给季节性明显, 季节性供需矛盾突出, 造成上市时间过于集中和“虾贱伤农”等现象, 因此其保鲜和加工是水产业所面临的一个重要难题。克氏原螯虾目前除了以鲜活销售方式之外, 主要以冷冻初加工和低温熟食制品的形式进行销售[1]。克氏原螯虾最常见的保存方法是低温[2], 在普通冷冻过程中, 极易受冻结过程中所产生的冰晶的影响, 导致其蛋白质变性、内部组织纤维化、肉质发柴、口感粗糙、持水力下降等品质劣化问题[3], 严重影响其食用品质效果和商品价值。

研究表明, 添加冷冻保护剂是目前使用较广的缓解水产品冻藏过程中品质劣变的有效措施[4]。Qi 等[5]研究发现 CMCO 在冷冻鱼糜水产品的过程中, 稳定了鱼糜凝胶的微观结构, 并提高了凝胶强度、粘弹性、持水能力和白度。Abdelnaby 等[6]研究发现,  $\gamma$ -PGA 处理显著增加了 WHC, 减缓了冷冻引起的蛋白质变性, 并保护了肌肉组织的结构稳定性。Walayat 等[7]研究发现, KC 有效地控制了蛋白质分子中的水分流动性, 提高了草鱼 MP 凝胶在冻藏 60 天期间的功能和凝胶能力。

在冷冻水产品中添加冷冻保护剂能有效控制冷冻过程中冰晶的活动, 使冰晶分布均匀, 尽可能减少水分形成冰晶或重结晶所带来的破坏, 降低损伤, 维持水产品在贮藏过程中的品质[8], 从而达到在大批量流通过程中保持良好的品质, 实现其产品的高附加值。Mulot 等[9]认为冷冻速度的高低会影响冰晶的大小。在低冷冻速率下, 可以获得较大的冰晶, 相反, 会形成大量的小冰晶。Sun 等[10]研究发现, 在冷冻过程中, 水产品的水分转化为冰晶, 抑制微生物生长, 减缓降解蛋白质或脂肪的酶活性, 有助于延长保质期。Li 等[11]研究发现, 冷冻速度主要影响冰晶的生长, 进而影响冰晶的大小、形态及其在食品内部的分布。

本研究通过对克氏原螯虾冷冻保护剂的研究, 综述了近年来冷冻加工行业所使用的冷冻保护剂的种类及特点, 包括糖类、酚类、盐类、抗冻肽类冷冻保护剂。同时对于冷冻保护剂在未来相关行业的应用中提供一些建议并做出展望, 为相关技术的开发应用和水产品冷冻保鲜措施提供一定的帮助。

## 2. 克氏原螯虾

克氏原螯虾, 也称小龙虾, 一种淡水螯虾, 隶属于节肢动物门甲壳纲十足目螯虾科[12], 其拉丁名为

*Cambaridae*。克氏原螯虾的头部呈三角形、背甲呈椭圆形、前肢较短而粗壮、后肢呈桨状，能够帮助它们在水中迅速游动。克氏原螯虾的甲壳呈灰色或橄榄绿色，背甲上有许多不规则的斑点和条纹。

克氏原螯虾的生活习性和繁殖能力都十分强大，是一种重要的淡水捕食者。克氏原螯虾原产于美国，并于 20 世纪三十年代从日本引进中国，近年来经过人工养殖发展，现已遍布国内许多省市，成为我国经济产值最大的淡水虾类品种[13]。自 20 世纪 70 年代以来，从最初的简单养殖加工，逐渐演变为一个综合性产业，包括育苗、养殖、加工、销售，以及餐饮、休闲旅游和文化等多个方面。截至 2021 年，中国的克氏原螯虾养殖面积达到 2600 万亩，产量达到 263.36 万吨，同比增长分别为 19.01% 和 10.02%，克氏原螯虾产业总产值达到 4221.95 亿元，同比增长 22.43% [14]。

克氏原螯虾口感鲜甜，肉质细嫩紧实，风味独特，具有高蛋白、低脂肪的特点，且富含锌、碘、硒等微量元素，是一种较为优质的水产品，倍受广大消费者的喜爱。我国小龙虾加工产业主要集中在湖南、湖北、安徽、江苏等地区，主要以冷冻粗加工为主，产品主要有虾仁、整虾、虾尾和虾球等，具有较高的经济效益[15]。

### 3. 克氏原螯虾冷冻保鲜技术

克氏原螯虾含有丰富的水分和蛋白质，但由于微生物容易滋生，蛋白质容易发生氧化和水解反应，导致产品质量和市场价值降低[16]。冷冻保鲜可以有效地抑制微生物的生长，延长食品的保质期，并且最大限度地保持克氏原螯虾原有的营养成分[17]。在不影响口感的前提下，大大减少不必要的浪费，为相关行业减少成本的支出。冷冻保鲜效果同时也受多种因素的影响，其关键因素包括产品的新鲜程度、产品的品种、微生物的初始负载、冷冻温度、储存时间、冷冻速率以及冷冻保护剂的选择等等。

Shi 等[3]使用新鲜的克氏原螯虾进行实验，将其在 $-18^{\circ}\text{C}$ 的冷冻温度下进行不同时间段的冷冻，并测试其品质变化。研究结果显示，随着冷冻时间的延长，克氏原螯虾中的  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性显著下降，直至第 24 周储藏结束时几乎消失，导致糊状结构严重改变，品质下降，硬度明显增加。赵立等[18]研究了熟制克氏原螯虾肉经过 $-20^{\circ}\text{C}$ 和 $-30^{\circ}\text{C}$ 冷冻后在 $-18^{\circ}\text{C}$ 储藏时的品质变化，发现这两种冷冻处理对克氏原螯虾的品质影响差别不大。崔自成等[19]表示随着贮藏时间增加， $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 的活性逐渐减弱，但冷冻速率越快，这种活性下降的速度会减缓。因此，更快的冷冻速率有助于维持产品品质。Zhao 等[20]研究中将克氏原螯虾在 $-20^{\circ}\text{C}$ 的冷冻条件下进行了为期 6 个月的保藏实验，发现不同冷冻速率对克氏原螯虾的新鲜度品质影响不大，这意味着过快的冷冻速率并非必要。

冷冻速率会影响冰晶的形态、大小和数量，进而对水产品的质量产生影响。特别是大而规则的冰晶会对水产品的组织结构造成严重损害。缓慢的冷冻速率会导致晶核数量减少，冰晶体积增大，而较大的空洞会严重扭曲肌肉细胞结构。冷冻温度是影响水产品货架期的重要因素，低温能够有效抑制产品的品质下降，延长产品的货架期[2]。谢晶等[21]表明可以通过升高或者降低冰晶的成核温度来改变冰晶的形态特征，从而减少冰晶对于冷冻水产品的破坏。传统冷冻冻结速度慢，会导致大冰晶生成[22]，破坏产品品质。目前许多研究表明快速冷冻对提高冷冻食品品质有积极作用[23]。同时也有众多学者研究表明，在克氏原螯虾制品加工过程中，冷冻速率的提高对克氏原螯虾品质的影响较小。

尽管冷冻技术已成为一种广泛使用的食品保鲜方法，但冰晶的形成和生长会导致克氏原螯虾组织破裂、脱水以及蛋白质变性，因此会降低其保水性、风味和营养价值。此外，解冻和加热过程中虾仁汁液流失增多，也会导致肉质变得更加坚硬、口感更粗糙，外观颜色也会变得更加暗淡[24]。为了能抑制水产品冷冻过程中品质的劣化及营养成分的流失，在冷冻处理前添加抗冻保护剂是一种普遍且有效的措施。近年来，有研究人员已经成功研发出专门的防冻化合物，可以减缓肌肉或其他生物组织中冰晶的生长速度，以减少冷冻技术对克氏原螯虾品质的不利影响。

## 4. 冷冻保护剂的研究进展

对于冷冻产品来说,保护剂即为抗冻剂,亦称抗冻保护剂。抗冻剂是一类可以与水或其他化学品混合,以有效降低其冰点,增强其抗冰力量,并起到溶化冰晶、防止冰晶生长的效果,同时还能够保持水分,从而起到防冻效果的物质。因此,可以认为任何可以与水或其他化学品混合,有效降低其冰点的物质都具备防冻的功能。由于虾肉蛋白质冷冻变性会导致腐败变质,抗冻剂已成为食品冷冻行业的重要组成部分,并被广泛应用于各个领域。早期的抗冻保护剂主要是多糖、二糖、多元醇以及少量高分子质量化合物[25]。随后,出现了蛋白类、盐类等多种类型的抗冻保护剂,并逐渐由单一发展到复合配比以增强抗冻效果[26]。目前,抗冻剂种类繁多,包括糖类、酚类、蛋白质水解物和抗冻肽等,它们都能有效地抵御冷冻损伤。

### 4.1. 糖类冷冻保护剂

糖类物质被广泛用于冷冻水产品,是最常见的一类抗冻保护剂。许多多糖及其低聚糖由于抑制冰晶形成和低温稳定作用而被用作水产品中的新型天然冷冻保护剂[27]。Parvathy 等[28]研究表明,糖类物质的特定基团能够与蛋白质分子中的羟基结合,从而阻止蛋白质分子之间的聚集和变性。此外,糖类物质的游离羟基还能吸附水分子,降低局部的“共晶点”温度,减少冰晶的形成,从而有效地防止蛋白质分子的聚集和变性。Rawdkuen 等[29]发现糖类物质的作用机理是透过改变蛋白质化合物表层的融合水,使其不再与其融合,进而有效地阻止蛋白改性,进而达到防冻效果。这两种观点实则共有共通之处,都是防止蛋白质变性而起到防冻的效果。

冷冻产品中的保护剂通常包括糖、糖醇类和糖类降解物,例如蔗糖、卡拉胶寡糖、麦芽糖、低聚木糖、山梨糖醇、葡萄糖、果糖、乳糖、海藻糖、麦芽糖、葡聚糖、麦芽糊精、壳聚糖和透明质酸等。多糖如蔗糖可以透过稳定水分子[30]、以玻璃态方式包覆蛋白质[31]或促使蛋白质化是合物中 $\alpha$ -螺旋构造的生成[32],有效地延缓蛋白质的冻结变性过程。

Donald 等[33]研究发现 4%蔗糖 + 4%山梨醇虽然抗冻效果好,但是具有高热能、高甜味的缺陷,影响了虾肉及虾肉制品的口感、营养价值,不符合当今“低糖”理念,因此需要更加安全和健康的防冻剂。近年来,为了保护克氏原螯虾的养分和感官品质,延长其贮藏时间,研究者们发展出了一系列低热量、低糖度的新式糖类防冻剂,以适应不同的需求。

卡拉胶寡糖是一种水溶性线性硫酸多糖,具有良好的稳定性和成胶性能[34]。卡拉胶寡糖是一款有效的冷冻保护剂,可以有效抑制克氏原螯虾肌肉蛋白的变性,从而提高其保质期。卡拉胶是一款多糖类化合物,它可以从红藻中提炼,并且在食用、化学工业等领域得到应用。Wang 等[35]研究发现卡拉胶在水产品的保鲜方面起着优异的效果,卡拉胶寡糖拥有出色的保水性,可以与蛋白质结合成为紧密的胶束。另外,Liao 等[36]研究发现 3%卡拉胶寡糖对小龙虾冷冻过程中的保水和延缓肌原纤维蛋白水解有明显效果。Shui 等[37]认为卡拉胶寡糖加入水产品中显着延缓了 $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性、总巯基和活性巯基含量的快速下降,并有效抑制了 MPs 羰基含量和表面疏水性的增加,从而在冷藏过程中起到了冷冻保护和抗氧化作用。Kilinc 等[38]研究发现卡拉胶寡糖可以抑制冰晶引起的克氏原螯虾肌原纤维组织损伤。

海藻糖是一款稳定的非还原性双糖,常被用作冻干保护剂,稳定菌体结构,已被广泛用作冷冻保护剂保存虾肉[39]。海藻糖由特殊双糖分子形成,具有与葡萄糖和蔗糖相似的羟基结构,可替代水化合物与蛋白质分子表面融合,从而有效保存蛋白质。海藻糖的分母尺寸极小,可轻松地填充到蛋白质分子的空隙中,有效阻止蛋白质结构的变化,从而避免克氏原螯虾的腐败变质。蒙健宗等[40]研究表明,10%的海藻糖可有效阻止冷冻罗非鱼片蛋白质改变。另外海藻糖的甜度比蔗糖、葡萄糖等糖类低,性质稳定,热量低,糖度低。因此,它在冷冻产品中具有显著的保护作用。



除了以上经常用于冷冻水产品的糖类外, Hajji 等人[41]研究发现壳聚糖纳米颗粒可适宜作为重组鱼鱼糜的冷冻保护剂。但并非所有的糖类冷冻保护剂都能够达到显著效果, Zhang 等人[42]研究了由木糖醇、山梨醇、赤藓糖醇、乳糖醇、甘露醇、麦芽糖醇和异麦芽糖醇组成的糖醇浸泡处理对南美白对虾在冷冻储存过程中品质特性的影响, 研究发现经木糖醇和甘露醇处理的虾的解冻、压榨和蒸煮损失、肌原纤维蛋白质含量、肌原纤维  $\text{Ca}^{2+}$ -ATP 酶活性及质构变量均有显著改善; 乳糖醇、异麦芽糖醇和麦芽糖醇在实验期间似乎对虾肌肉的冷冻保护作用没有显著贡献。

## 4.2. 酚类冷冻保护剂

酚类保护剂可以作为一种抗氧化剂, 能够有效地延缓食品的氧化过程, 减少脂肪氧化和蛋白质变性, 从而保护克氏原螯虾在冷冻过程中的质量。酚类保护剂可以通过捕捉自由基, 阻止氧化反应的进行, 减少脂肪酸的氧化和蛋白质的变性, 保持克氏原螯虾的新鲜度和营养成分。此外, 酚类保护剂还可以减少冷冻过程中产生的异味和不良气味, 改善产品的口感和风味。

吕卫金等[43]研究表明酚类物质可以有效地消除活性氧自由基, 阻断其链型化学反应。加强抗氧化酶系, 可以有效抑制脂肪氧化系统, 防止蛋白质的褶皱, 进而防止蛋白质因构象变化而导致的变性[44], 从而有效的减少水产品肌肉蛋白的冷冻变性。Albuoueros 等[45]研究了添加不同天然酚类化合物对小沙丁鱼冷冻储存鱼糜营养品质有一定的作用。酚类物质作为冷冻产品中的保护剂, 主要以茶多酚作为主要研究对象。茶多酚是一类纯天然的抗氧化剂, 它来自植物中提炼的多种苯酚化学物质, 拥有卓越的抗氧化力量, 通过有效地维护人体免受自由基的侵害, 从而改善人们的健康状况。茶多酚是一类广泛存在的多酚, 它易于获取, 并且对人类健康有益。因此, 茶多酚非常适合用作冷冻水产品的保护剂。此外, 由于茶多酚富含酚羟基, 它还具备较强的抗氧化力量。酚类化合物能够与肌原纤维蛋白产生非共价和共价的作用, 这种作用主要由半醌和醌组成, 它们能够改变蛋白质的功能和结构, 从而直接危害冷冻产品的质量, 有效地防止产物的腐败变质。酚类冷冻保护剂表现出优异的冷冻保护作用, 同时避免了传统糖基或磷酸盐冷冻保护剂引起的健康问题和不良味道[46]。

## 4.3. 盐类冷冻保护剂

盐类保护剂在克氏原螯虾冷冻保护中起着重要作用。克氏原螯虾是一种重要的海产品资源, 但在冷冻过程中容易受到冰晶的伤害, 导致质量下降。盐类保护剂可以通过调节细胞内外的渗透压和离子浓度, 减少冰晶的形成和对细胞的损伤, 从而保护克氏原螯虾的质量。具体来说, 盐类保护剂可以在冷冻过程中形成一个保护性的渗透压, 减少细胞内外的渗透压差, 从而降低冰晶的形成速度。同时, 盐类保护剂还可以保持细胞内的水分平衡, 减少冷冻过程中细胞膜的破裂和蛋白质的变性, 保护克氏原螯虾的细胞结构和营养成分。因此, 在克氏原螯虾的冷冻保护中, 盐类保护剂可以有效地提高产品的质量和口感, 并延长其货架期。盐类物质广泛存在于自然界中。

磷酸盐是一种广泛应用于肉制品和水产品加工中的添加剂, 它能够改善产品的质地, 保持产品的持水性, 并且价格相对较低, 易于获得。在冷冻过程中, 水产品中的水分会结冰, 导致产品质量下降和口感变差。为了防止这种情况发生, 盐类冷冻保护剂可以被添加到水产品中, 以降低水的冰点, 延迟结冰的时间。盐类冷冻保护剂可以通过调节水产品中的盐度来实现这一目的。通过增加水产品中的盐度, 可以降低水的冰点, 延缓结冰的速度, 从而保持水产品的质量和口感。此外, 盐类冷冻保护剂还可以帮助保持水产品的的新鲜度和延长货架寿命。因此, 它在国内外食品企业中得到了广泛使用。磷酸盐类物质具有保持食品水分的功能, 可以有效地提高食品的口感和营养价值。因此对冷冻克氏原螯虾有着重要作用。对于盐类冷冻保护剂在水产品中的研究相对其他的冷冻保护剂要较少, 张静雅[47]发现复合磷酸盐具有显

著的电离能力, 能够有效地提升冷冻产品肉的 pH 值, 从而增加肌动球蛋白的亲水性, 并且能够有效地延缓蛋白质的冷冻变性。不过需要注意的是, 过量摄入磷酸盐会影响钙的吸收[48]。

#### 4.4. 抗冻肽冷冻保护剂

抗冻肽是一类小分子蛋白质水解物, 可保护冷冻产品在冷冻或过冷条件下免受损害[49]。近年来, 抗冻肽的研究受到了广泛关注, 它们被认为是一类有效的防冻剂, 可以有效地保护生物体免受损害。Wu 等[50]研究发现它们具备传统商业防冻剂和自然抗冻蛋白无法比拟的优点, 因此在冷冻食品中得到了广泛应用。抗冻肽是一种通过特异性酶切位点水解技术从食物中提取的蛋白质, 具备抗冻性和抗炎性[51]。Cao 等[52]通过实验认为其一般是一种热滞后蛋白质, Dang 等[53]发现其与水结合之后不仅能够抑制冰晶的生长, 另外也能够防止冰晶的再结晶。因此抗冻肽可以作为一类新型食品保护剂, 可以有效减少冷链加工过程食品中冰晶的形成和重结晶, 从而提高低温冷链加工食品的品质。Yasemi [54]研究表明风味蛋白酶水解物具有抑制小龙虾肌球蛋白变性和减缓肌肉脂质氧化速率的作用。因此, 在小龙虾加工过程中, 它可以作为一种冷冻保护剂使用, 有助于保持小龙虾的新鲜度。

### 5. 结语与展望

随着消费升级和冷链物流运输技术的进步, 克氏原螯虾预制菜也逐步进入主流餐饮市场, 受到终端消费者的欢迎。随着保鲜、贮运方式的不断进步, 消费者对冷冻水产品新鲜、安全、营养和健康的要求越来越高, 确保冷冻产品在冷链条件下的品质安全和质量是至关重要的, 因此对添加冷冻保护剂到冷冻克氏原螯虾类水产品中的研究也日益深入。

文章主要介绍了冷冻保护剂对克氏原螯虾品质的影响研究, 包括糖类、酚类、盐类、抗冻肽类冷冻保护剂。自商业抗冻保护剂广泛应用以来, 国内外学者一直在努力改进这些产品, 并探索更低热量、无味的替代品。他们还进行了大量研究, 以确定新发现的抗冻保护剂的最佳使用剂量和方法。此外, 学者们还致力于研究如何实现抗冻保护剂在食品中的均匀分布, 以提高肉类和水产品的冷冻品质。由于单一的抗冻剂难以在冷冻过程中起到全面的保护效果, 所以根据不同品类的冷冻产品, 各类抗冻剂取长补短, 互相促进, 才能提高冷冻产品的稳定性。通过科学家不断的研究, 未来也将会出现更先进的包装材料延长冷冻产品的保鲜期。同时随着技术的不断进步, 更加精确的冷冻过程监测技术也将更新发展, 实时监测冷冻产品的温度变化, 及时调整冷冻保鲜设备的工作状态, 以确保产品的品质。科学家们也在致力研究新型的冷冻保护剂和冷冻保鲜技术, 为未来冷冻保鲜领域做出巨大贡献。

### 基金项目

安徽省高校科学研究重点项目“小龙虾绿色高效保质减损关键技术研究及其应用”(No. 2022AH051089)、国家级大学生创新创业训练计划“物理电场辅助低温保鲜技术对克氏原螯虾质地品质的影响研究”(No. 2023CXXL108)、滁州学院科研启动基金“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)。

### 参考文献

- [1] 高晓光, 吕蒙, 臧芳波, 等. 小龙虾加工与保鲜技术研究进展[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(12): 126-131, 139.
- [2] 王芳, 周国燕. 甲壳类水产品变质问题和低温保鲜及其辅助技术的研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(4): 106-112, 121.
- [3] Shi, L., Xiong, G., Ding, A., *et al.* (2018) Effects of Freezing Temperature and Frozen Storage on the Biochemical and Physical Properties of *Procambarus clarkii*. *International Journal of Refrigeration*, **91**, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.027>

- [4] 贾世亮, 丁娇娇, 杨月, 等. 水产品速冻保鲜技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 48(11): 324-331.
- [5] Qi, X., Yin, M., Qiao, Z., *et al.* (2022) Freezing and Frozen Storage of Aquatic Products: Mechanism and Regulation of Protein Oxidation. *Food Science and Technology*, **42**, e91822. <https://doi.org/10.1590/fst.91822>
- [6] Abdelnaby, T., Li, Z., Cao, W. and Xue, C.H. (2023) The Effect of Gamma-Poly Glutamic Acid as a Cryoprotectant on Crayfish Physicochemical and Texture Properties during Frozen Storage. *Food Science and Technology*, **184**, Article ID: 114905. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114905>
- [7] Walayat, N., Wang, X., Liu, J., *et al.* (2022) Kappa-Carrageenan as an Effective Cryoprotectant on Water Mobility and Functional Properties of Grass Carp Myofibrillar Protein Gel during Frozen Storage. *Food Science and Technology*, **154**, Article ID: 112675. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112675>
- [8] 蔡路昀, 台瑞瑞, 曹爱玲, 等. 冷冻因素对水产品品质的影响及冷冻保鲜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(20): 308-313, 319.
- [9] Mulot, V., Fatou-Toutie, N., Benkhelifa, H., *et al.* (2019) Investigating the Effect of Freezing Operating Conditions on Microstructure of Frozen Minced Beef Using an Innovative X-Ray Micro-Computed Tomography Method. *Journal of Food Engineering*, **262**, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.05.014>
- [10] Sun, Q., Zhao, X., Zhang, C., *et al.* (2019) Ultrasound-Assisted Immersion Freezing Accelerates the Freezing Process and Improves the Quality of Common Carp (*Cyprinus carpio*) at Different Power Levels. *Food Science and Technology*, **108**, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.042>
- [11] Li, D., Zhu, Z. and Sun, D.W. (2018) Effects of Freezing on Cell Structure of Fresh Cellular Food Materials: A Review. *Trends in Food Science & Technology*, **5**, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.02.019>
- [12] 殷磊. 即食干制对虾加工工艺及货架期预测[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2018.
- [13] 黄鸿兵, 于波, 王冬蕾, 等. 克氏原螯虾养殖现状及其系统工程化展望[J]. 水产养殖, 2021, 42(12): 68-71.
- [14] 石玉, 冯光志, 何立超. 克氏原螯虾肠道菌群的结构、功能及其影响因素[J]. 中国酿造, 2023, 42(11): 28-33.
- [15] 郑静静. 冷冻加工对小龙虾品质影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [16] Wang, J., Tang, J., Rasco, B., *et al.* (2018) Kinetics of Quality Changes of Shrimp (*Litopenaeus setiferus*) during Pasteurization. *Food and Bioprocess Technology*, **11**, 1027-1038. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2073-x>
- [17] Gao, W., Hou, R. and Zeng, X.A. (2018) Synergistic Effects of Ultrasound and Soluble Soybean Polysaccharide on Frozen Surimi from Grass Carp. *Journal of Food Engineering*, **240**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.003>
- [18] 赵立, 陈军, 邵兴锋, 等. 冷冻方式对熟制克氏原螯虾肉冷冻贮藏(-18℃)条件下品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(10): 232-234.
- [19] 崔自成, 黄东, 赵日晶, 等. 水产品冷冻品质影响因素[J]. 食品工程, 2022(1): 12-15.
- [20] Zhao, L., Chen, J., Zhao, X.R., *et al.* (2014) Effects of Different Freezing Rates on the Quality Changes in Cooked Crayfish (*Procambarus clarkia*) Meat during Frozen Storage (-20℃). *Advanced Materials Research*, **1033-1034**, 673-676. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1033-1034.673>
- [21] 谢晶, 谭明堂, 范敏浩. 冰晶的形成和影响因素及其对水产品品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(9): 1-6.
- [22] Xie, Y., Zhou, K., Chen, B., *et al.* (2021) Applying Low Voltage Electrostatic Field in the Freezing Process of Beef Steak Reduced the Loss of Juiciness and Textural Properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **68**, Article ID: 102600. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102600>
- [23] Cheng, L., Sun, D.W., Zhu, Z. and Zhang, Z. (2017) Emerging Techniques for Assisting and Accelerating Food Freezing Processes: A Review of Recent Research Progresses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **57**, 769-781. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1004569>
- [24] Ehsani, A. and Jasour, M.S. (2014) Safety Assessment of Crayfish (*Astacus leptodactylus* ESCH., 1823) from Microbial Load and Biogenic Amines Signature: Impact of Post-Catch Icing and Frozen Storage. *International Journal of Food Properties*, **17**, 1714-1725. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.703276>
- [25] 李敏涵, 李洪军, 李少博, 等. 抗冻保护剂在肉品及水产品贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 294-301.
- [26] Yamazaki, A., Nishimiya, Y., Tsuda, S., *et al.* (2018) Gene Expression of Antifreeze Protein in Relation to Historical Distributions of Myoxocephalus Fish Species. *Marine Biology*, **165**, Article No. 181. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3440-x>
- [27] Liu, Z., Yang, W., Wei, H., *et al.* (2023) The Mechanisms and Applications of Cryoprotectants in Aquatic Products: An Overview. *Food Chemistry*, **408**, Article ID: 135202. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135202>
- [28] Parvathy, U. and George, S. (2014) Influence of Cryoprotectant Levels on Storage Stability of Surimi from *Nemipterus*

- japonicus* and Quality of Surimi-Based Products. *Journal of Food Science and Technology*, **51**, 982-987. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0590-y>
- [29] Rawdkuen, S., Jongjareonrak, A., Phatcharat, S., *et al.* (2010) Assessment of Protein Changes in Farmed Giant Catfish (*Pangasianodon gigas*) Muscles during Refrigerated Storage. *International Journal of Food Science & Technology*, **45**, 985-994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02217.x>
- [30] Macdonald, G.A. and Lanier, T.C. (1991) Carbohydrates as Cryoprotectants for Meats and Surimi. *Food Technology*, **45**, 150-159.
- [31] Curry, M.R., Watson, P.F., Carpenter, J.F., *et al.* (1987). Stabilization of Dry Phospholipid Bilayers and Protein by Sugars. *Biochemistry*, **242**, 1-10. <https://doi.org/10.1042/bj2420001>
- [32] 汪兰, 吴文锦, 乔宇, 等. 冻藏条件下魔芋葡甘聚糖降解产物对肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 244-249.
- [33] Donald, G.A.M. and Lanier, T.C. (1994) Actomyosin Stabilization to Freeze Thaw and Heat Denaturation by Lactate Salts. *Food Science*, **59**, 101-105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb06907.x>
- [34] 尚珊, 于书蕾, 臧梁, 等. 海藻糖和卡拉胶寡糖对冷冻面团冻藏稳定性和烘焙特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 207-216.
- [35] Wang, Q., Zhou, C., Xia, Q., *et al.* (2024) PH Sensitive Cold-Set Hydrogels Based on Fibrinogen Hydrolysates/Carrageenan: Insights of Rheology, Coacervation, Microstructure and Antioxidant Ability. *Food Hydrocolloids*, **147**, Article ID: 109377 <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109377>
- [36] Liao, E., Wu, Y., Pan, Y., *et al.* (2023) Cryoprotective Effects of Carrageenan Oligosaccharides on Crayfish (*Procambarus clarkii*) during Superchilling. *Foods*, **12**, Article 2258. <https://doi.org/10.3390/foods12112258>
- [37] Shui, S., Qi, H., Shaimaa, H., *et al.* (2021) Kappa-Carrageenan and Its Oligosaccharides Maintain the Physicochemical Properties of Myofibrillar Proteins in Shrimp Mud (Xia-Hua) during Frozen Storage. *Journal of Food Science*, **86**, 140-148. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15547>
- [38] Kilinc, B., Cakli, S., Dincer, T. and Cadun, A. (2009) Effects of Phosphates Treatment on the Quality of Frozen-Thawed Fish Species. *Journal of Muscle Foods*, **20**, 377-391. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.2009.00154.x>
- [39] 连战, 王松江, 郭传庄, 等. 海藻糖与赤藓糖醇偶联发酵工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(12): 147-153.
- [40] 蒙健宗, 秦小明, 赵文报, 等. 海藻糖对冷冻罗非鱼片蛋白质变性作用的影响[J]. 食品工业科技, 2007(2): 214-216.
- [41] Hajji, S., Hamdi, M., Boufi, S., *et al.* (2019) Suitability of Chitosan Nanoparticles as Cryoprotectant on Shelf Life of Restructured Fish Surimi during Chilled Storage. *Cellulose*, **26**, 6825-6847. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02555-1>
- [42] Zhang, B., Yao, H., Qi, H., *et al.* (2020) Cryoprotective Characteristics of Different Sugar Alcohols on Peeled Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during Frozen Storage and Their Possible Mechanisms of Action. *International Journal of Food Properties*, **23**, 95-107. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1710533>
- [43] 吕卫金, 赵进, 汪金林, 等. 茶多酚延缓冷藏大黄鱼肌原纤维蛋白变性降解机理研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(1): 60-67.
- [44] 梁慧, 于立梅, 陈秀兰, 等. 多酚对鸡肉氧化脂肪诱导蛋白质变性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(5): 146-151.
- [45] Albuquerque, D.C.T.S., Lima, L.E.S., Silva, D.C.V.F., *et al.* (2022) Oxidative Stability of Green Weakfish (*Cynoscion virescens*) By-Product Surimi and Surimi Gel Enhanced with a *Spondias mombin* L. Waste Phenolic-Rich Extract during Cold Storage. *Food Bioscience*, **50**, Article ID: 102021. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102021>
- [46] Zhang, Y., Yu, Q., Liu, Y., *et al.* (2023) Dual Cryoprotective and Antioxidant Effects of Young Apple Polyphenols on Myofibrillar Protein Degradation and Gelation Properties of Bighead Carp Mince during Frozen Storage. *Journal of Food Science*, **88**, 4560-4573. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16781>
- [47] 张静雅. 白鲢鱼糜蛋白的冷冻变性机理及抗冻剂的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [48] Tao, L., Tian, L., Zhang, X., *et al.* (2020) Effects of  $\gamma$ -Polyglutamic Acid on the Physicochemical Properties and Microstructure of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) Surimi during Frozen Storage. *Food Science and Technology*, **134**, Article ID: 109960. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109960>
- [49] Xu, Z., Zhu, Z., Tu, M., *et al.* (2023) Characterizations and the Mechanism Underlying Cryoprotective Activity of Peptides from Enzymatic Hydrolysates of *Pseudosciaena crocea*. *Foods*, **12**, Article 875. <https://doi.org/10.3390/foods12040875>
- [50] Wu, J.H., Rong, Y.Z., Wang, Z.W., *et al.* (2015) Isolation and Characterisation of Sericin Antifreeze Peptides and Molecular Dynamics Modelling of Their Ice-Binding Interaction. *Food Chemistry*, **174**, 621-629.



---

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.100>

- [51] 潘海博, 覃璐琪, 黄燕婷, 等. 人工神经网络结合遗传算法优化保护剂提高罗伊氏乳杆菌抗冻性能[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 70-77.
- [52] Cao, H., Zhao, Y., Zhu, Y. B., *et al.* (2016) Antifreeze and Cryoprotective Activities of Ice-Binding Collagen Peptides from Pig Skin. *Food Chemistry*, **194**, 1245-1253. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.102>
- [53] Dang, M.Z., Wang, R.F., Jia, Y.Y., *et al.* (2020) The Antifreeze and Cryoprotective Activities of a Novel Antifreeze Peptide from *Ctenopharyngodon idella* Scales. *Foods*, **11**, Article 1830. <https://doi.org/10.3390/foods11131830>
- [54] Yasemi, M. (2017) Prevention of Denaturation of Freshwater Crayfish Muscle Subjected to Different Freeze-Thaw Cycles by Gelatin Hydrolysate. *Food Chemistry*, **234**, 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.183>