

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.038

低温液态速冻技术及其在水产品加工中应用研究进展

Research progress of cryogenic liquid quick-freezing and its application in the processing of aquatic products

赵茜^{1,2,3} 李学鹏^{1,2,3} 王金厢^{1,2,3} 朱文慧^{1,2,3}
 ZHAO Xi^{1,2,3} LI Xue-peng^{1,2,3} WANG Jin-xiang^{1,2,3} ZHU Wen-hui^{1,2,3}
 徐永霞^{1,2,3} 励建荣^{1,2,3} 李婷婷⁴ 郭晓华⁵

XU Yong-xia^{1,2,3} LI Jian-rong^{1,2,3} LI Ting-ting⁴ GUO Xiao-hua⁵

(1. 渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013; 2. 渤海大学生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013; 3. 渤海大学国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心, 辽宁 锦州 121013; 4. 大连民族大学生命科学学院, 辽宁 大连 116600; 5. 山东美佳集团有限公司, 山东 日照 276815)

(1. College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center of Storage Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural Products, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China; 3. National R & D Branch Centre for Surimi and Surimi Products Processing, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China; 4. College of Life Science, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China; 5. Shandong Meijia Group Co., Ltd., Rizhao, Shandong 276815, China)

摘要: 文章介绍了低温液态速冻技术的作用原理与技术特点, 论述了所用载冷剂的研发情况, 重点总结探讨了低温液态速冻技术在水产品加工中的应用研究现状、存在的技术问题与发展趋势。

关键词: 低温液态速冻; 载冷剂; 水产品; 冻品品质

Abstract: The working principle and technical characteristics of cryogenic liquid quick-freezing technology was introduced in this paper, then the research and development of freezing medium was discussed. The current research status, technical issues and the development trend of the application of cryogenic liquid quick-freezing technology in aquatic products processing was mainly summarized and discussed.

Keywords: cryogenic liquid quick-freezing; freezing medium; aquatic products; quality of frozen products

基金项目: 国家重点研发计划课题(编号: 2019YFD0901605, 2019YFD0901702); 辽宁省兴辽英才计划项目(编号: XLYC1807133)

作者简介: 赵茜, 女, 渤海大学在读硕士研究生。

通信作者: 王金厢(1981—), 女, 渤海大学实验师, 硕士。

E-mail: jinxiang1008@163.com

收稿日期: 2020-07-03

中国是水产品生产大国, 2018年全国水产品总量达6 457.66万t^[1], 连续多年位居世界第一。水产品营养丰富, 具有高蛋白、低脂肪等特点, 已成为居民合理膳食中摄取优质动物性蛋白的重要来源^[2]。然而, 水产品因含水量高、肌肉pH呈中性及富含大量小分子物质等特点, 极易滋生微生物, 发生腐败。中国水产品产品在贮运过程中因腐败导致的损耗率高达15%左右, 远高于发达国家的平均损耗率(5%), 造成了严重的资源浪费^[3]。冷冻能抑制微生物生长繁殖及内源酶活性, 延缓肌肉组织腐败, 有效提升水产品品质及延长货架期, 因此对渔获物及时进行冷冻和冻藏处理是减少水产品产后腐败损耗的主要途径^[4]。

水产品常用冻结方式如表1所示。传统风冷冻结和平板冻结多存在冻结速率慢和冻品质量差的缺陷, 而深冷气体冻结存在冷冻介质损耗严重和经济成本高的问题^[5,7,9]。近年来, 随着水产品加工业和机械制造业的快速发展, 低温液态速冻技术得到了较为广泛的研究应用。低温液态速冻又称液体冻结、浸渍式冻结, 通过低温载冷剂与样品直接或间接接触进行换热, 使物料迅速降温, 实现快速冻结^[11]。

表 1 水产品中常用的冻结方式

Table 1 Common freezing methods for aquatic products

冻结方式	作用原理	主要优势	技术问题	适用范围	参考文献
风冷冻结	空气冻结和鼓风冻结(隧道式、螺旋式、流化床式装置)以空气为传热介质	设备简单,操作方便;可连续操作;适于冷库使用	冷冻效率低;产生冰晶大,细胞损伤严重;干耗严重,质地差	各类水产品,应用最为广泛	[5-6]
平板冻结 (接触式冻结)	样品直接与低温状态的金属装置相接触进行换热	冻结速度快,可减少冻品干耗和变色	冻结不均匀,难以控制冻品形状	形状规则的水产物料	[7-8]
深冷气体冻结 (液化气体冻结)	将液态氮或液态二氧化碳制冷剂直接喷射于样品,使其瞬间冻结	传热系数大,冻结速度快;冰晶细小均匀;冷冻干耗少	难以回收重复利用,成本较高;不利于工业化生产;冻品龟裂现象严重	贝类和蟹类等经济价值高的水产品	[9-10]
低温液态速冻	利用低温载冷剂与样品直接或间接接触进行换热,使物料迅速降温,实现快速冻结	冷冻速率快;冻品品质好;便于单体速冻;能耗低,节约成本	载冷剂连续使用后质量下降;直接浸渍易产生溶质渗透;载冷剂与冻品温差过大时产生龟裂	鱼、虾、蟹、贝类等各种水产品	[11-12]

文章拟介绍低温液态速冻技术的工作原理和技术特点,分析所用载冷剂的研究开发情况,重点总结低温液态速冻技术在水产品加工中的应用研究现状,分析低温液态速冻目前存在的技术问题并对其进行发展趋势进行讨论,以期低温液态速冻技术在水产品冷冻加工中的推广应用及冻品品质控制提供依据。

1 低温液态速冻技术原理及特点

1.1 技术原理

低温液态速冻技术主要利用盐、醇、糖等组成的二元、三元及多元冷冻液作为载冷剂,与食品直接或间接接触,并通过传热传质过程达到快速冷冻目的^[11]。空气冻结传热系数约为 $20 \sim 30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,而液体冷冻的传热系数约为 $200 \sim 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,是空气冻结的 $10 \sim 25$ 倍^[13]。传质过程主要表现为同温度下水、冰蒸汽压不同导致的蒸汽压差作用下,食品与载冷剂间相互渗透,载冷剂中溶质在低温冷冻传递过程中进入食品,食品中的可溶性物质和水分进入到载冷剂中,但传质过程伴随水结冰的相变过程,迁移前凝结成冰减少水分流失,因此质量损失小^[14]。

1.2 技术特点

1.2.1 冻结速度快 常用的空气冻结传热介质为空气,低温液态速冻传热介质为液体载冷剂,传热系数远高于空气,因此冻结速度快。Fikiin 等^[15]建立的液体冷冻系统,表面传热系数可达 $720 \sim 760 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,约为空气冻结传热系数的 25 倍。董佳等^[16]研究发现,液体冷冻处理的鲟鱼冷冻速率为空气冻结的 12.47 倍。

1.2.2 冻品质量高 低温液态速冻可显著提高冻结速率,缩短跨越最大冰晶生成带时间,形成的冰晶细小且均匀,能有效减小晶核形成和冰晶生长造成的细胞损伤^[17]。同时,导热较快的载冷剂能够快速降低样品温度,减缓畜

禽及水产类样品的生化反应。另外,传统空气冻结因空气对流极易造成干耗^[18],而低温液态速冻因接触载冷剂快速传热可有效减少冻品干耗现象。

1.2.3 便于单体速冻 基于低温液态速冻以特定液体为载冷剂的特点,使用过程中伴随载冷剂的流动即可实现单体速冻。近年来,国内外研制了适用于低温液体冷冻的装置设备,相比其他隧道式冻结设备,其能够实现快速冻结,冻结后可进行小包装,适用于蔬菜类和水产类食品的单体速冻^[19]。

1.2.4 节省能耗,降低冷冻成本 低温液态速冻在节省能耗和降低成本方面具有较大优势,主要原因是^[20-21]:与空气冻结相比,不需要维持冷空气的高流速;设备外形尺寸较小,所需固定投资低;冷冻耗时短,可以提高设备利用率。Shaikh 等^[22]研究表明,液体冷冻设备的经济投入是鼓风隧道式冻结设备的 $1/4$ 。Lucas 等^[11]对沙丁鱼的研究指出,相比于空气冻结,液体浸渍冷冻可以节省约 50% 的经济成本和操作时间。

低温液态速冻因载冷剂与食品间的传热传质过程,样品冷冻速率快、传热效率高、冻品品质好(形成的冰晶细小均匀,能够减少细胞组织损伤,提高冻品品质),结合能耗低和易实现单体速冻的技术特点,其应用前景十分广阔^[12]。

2 水产品低温液态速冻载冷剂的研究进展

2.1 盐类

以盐类和水混合作为载冷剂,如氯化钠、氯化钙水溶液在远洋船上水产品冻结保鲜方面应用广泛^[23]。相比于空气冻结,冷盐水冻结保鲜的能耗可降低 25% 以上,冷冻过程中的传热速率是空气冻结的数倍^[24]。Fikiin^[25]以氯化钠溶液作为载冷剂,证明了液体冻结传热效能高,鱼体微观组织结构更完整。然而,盐水的使用极易腐蚀冷冻

设备,严重限制低温液态速冻技术的发展。

2.2 醇类

醇类如乙醇、乙二醇、丙二醇、丙三醇等因冻结点低常被用作低温载冷剂组分,考虑到食品用载冷剂的安全性问题,醇类载冷剂一般选用乙醇、丙二醇和丙三醇。醇类用作载冷剂可以显著提高冷冻速率,延缓蛋白质降解和冷冻变性,保持冻品品质^[26-27]。但乙醇存在强挥发性问题,冷冻过程消耗量较大,而丙二醇、丙三醇低温下黏度大,浓度过高影响系统运行。

2.3 糖类

常用作载冷剂的糖类主要包括蔗糖、果糖、葡萄糖以及转化糖等^[28-29]。而糖类水溶液单独使用存在冻结点较高且黏度大的问题^[30],多以复配组分出现在载冷剂中,辅助提高水产品冻藏保鲜品质。张临新等^[31]研发了以氯化钠、乙醇、丙三醇和食用蔗糖为主要成分的载冷剂,-40℃时可保持液体状态,适用于小黄鱼冷冻。吴燕燕等^[32]以丙二醇、低聚糖类和盐类等成分复配载冷剂处理石斑鱼,能较好地保持鱼肉品质。

2.4 新型载冷剂组分

除常用盐、醇及糖类载冷剂外,研究人员也致力于开发新型载冷剂组分。杨贤庆等^[33]开发了甜菜碱作为载冷剂的主要成分,并将其应用于脆肉鲩保鲜,发现样品冻结速率快,质地保持较好。Yang等^[34]向乙醇水溶液为主要组分的载冷剂中添加葡聚糖、冰核活性蛋白等物质,显著减小了暗纹东方鲀鱼片冰晶直径和截面面积。甜菜碱、葡聚糖和冰核活性蛋白等新组分的开发应用丰富了载冷剂组成,但鉴于水产品种类的多样性和肌肉组织的差异性,新型载冷剂组分的研发还需持续推进。

2.5 多元复配载冷剂

由于盐、醇及糖类等物质单独与水结合用作载冷剂多存在腐蚀性强、挥发性大和黏度大等问题,近年来针对多元复配载冷剂的研究在逐步扩大。马晓斌等^[35]采用响应面优化冷冻液配方为20%乙醇、10%丙二醇、7%甜菜碱和10%氯化钠水溶液,可显著减缓脆肉鲩肌原纤维蛋白的冷冻变性。多元复配载冷剂的开发可以进一步降低冻结点,提高冷冻速率,促进食品表面冰层快速形成,减少溶质渗透,成为低温液态速冻技术的重要研究方向。

3 水产品低温液态速冻技术应用研究进展

低温液态速冻依据载冷剂与水产品的接触方式不同,可以分为直接浸渍液态速冻和间接接触(预包装)液态速冻。此外,在水产冷冻行业快速发展的背景下,液体冷冻结合其他辅助冷冻手段在控制冰晶尺寸、保障冻品品质方面得到了广泛应用。

3.1 直接浸渍液态速冻

低温液态速冻中的直接浸渍冷冻发展最早,主要通

过水产品与低温载冷剂的直接接触完成快速降温及冻结过程^[36]。相比传统冷冻方式,直接浸渍冷冻在鱼类^[37]、虾类^[38]中的应用有效提高了冷冻速率,减少了冻品的水分流失,延缓了水产品腐败,更利于水产品冷冻加工和冻藏品质保持。蟹类经济价值高,极不易贮藏,相关的冷冻研究多以液氮冻结为主^[39],但近年来相关研究^[34]发现低温载冷剂冻结具有替代液氮冻结,保持蟹肉品质的潜力。然而,直接浸渍冷冻的溶质渗透现象较难控制,渗入载冷剂成分的安全性存在较大问题。因此,进一步研发适宜载冷剂组分及对多元载冷剂进行合理配比以减少溶质渗透成为直接浸渍液态速冻的重要发展方向。

3.2 间接接触(预包装)液态速冻

近年来,采用的间接接触液态速冻,即对水产品采用预包装处理后进行液态速冻,可有效避免直接浸渍过程的溶质渗透,在提升水产品冷冻速率和延长流通货架期方面作用显著^[40]。此外,预包装后液态速冻在鱼类^[41]、虾类^[42]和贝类^[43]中的研究表明,真空包装对减少冻藏期间水产品干耗、抑制脂肪氧化和蛋白冷冻变性有显著效果。但预包装材料的阻隔作用对液体冷冻传热效率影响较大,因此,在冻结过程中需选择高热效率的包装材料最大程度地减小对传热过程的影响。此外,现有的研究多集中在真空预包装联合液体冷冻方面,真空操作的压力、时间控制成为预包装过程的关键控制点。综合间接接触的优劣势,展开深入的研究探讨,对于低温液态速冻的推广应用和冻品品质控制具有重要意义。

3.3 结合其他辅助冷冻手段

在水产冷冻行业快速发展的背景下,为最大限度保持冷冻产品的品质,Sun等^[44]探究了液体冷冻结合其他辅助手段对产品冰晶尺寸和冻品品质的影响。其中,超声辅助浸渍冷冻在诱导晶核形成、减小冰晶尺寸、提高冷冻速率和保障冻品质量方面具有显著作用^[44-45]。但目前超声辅助液体冷冻的研究还处于探索阶段,在实际生产中的应用较少。此外,基于低温液态速冻的射频辅助冻结多以液氮作为冷冻介质,成本较为昂贵,实现工业化推广具有一定难度^[4]。新兴的辅助冷冻手段大多对晶核形成和冰晶生长具有良好的控制能力^[46],但冻结过程中蛋白质的理化性质会发生复杂的变化,也可能带来负面影响,尚待深入探讨。

4 水产品低温液态速冻技术存在的问题及研究趋势

4.1 存在的问题

低温液态速冻技术虽然具有冻结效率高、冻结品质好、能耗低等优点,但也存在一些技术问题,制约着技术的发展和推广应用,如载冷剂连续使用质量下降、溶质渗透安全性及冻品龟裂问题等,需进一步研究。

4.1.1 载冷剂连续使用质量下降 工业化生产中,载冷

剂因连续重复使用,部分成分会出现挥发以及氧化等现象,致使载冷剂的冻结点、比热容、传热系数和黏度等热物理特性发生变化^[38]。此外,直接浸渍冷冻下,水产品中的水溶性物质、有机成分发生浸出,残留碎屑脱落以及微生物污染等易造成载冷剂的质量下降^[14]。

4.1.2 载冷剂溶质渗透问题 Cipolletti 等^[47]将冷冻过程中载冷剂的渗透机制概括为 3 种类型:样品多孔表面吸附载冷剂中的溶质;样品中局部脱水组织的吸附作用;样品和载冷剂间存在的浓度差驱动下溶质向样品中扩散。在液体直接浸渍冷冻传热传质作用下,水产品中浸入载冷剂组分会影响产品品质,严重时可能会导致安全性问题。

4.1.3 易发生龟裂现象 采用低温液态速冻时,样品表面水分首先结冰,内部水分冻结时受到外部冰层的阻碍产生膨胀压,超过外部冰层承受极限时冻品会出现龟裂现象^[14]。Pham 等^[48]指出,样品表面一旦出现龟裂,膨胀压作用下导致的组织撕裂损伤会持续延伸至冻品中心。特别是厚度大、体积大和含水率高的水产品,当液体冷冻表面温度下降极快时易产生龟裂。

4.2 研究趋势

4.2.1 冷冻过程数值模拟研究 基于冷冻过程的复杂性,使用数值模拟技术预测冷冻过程中的传热传质情况,可以促进低温液态速冻技术在食品中的广泛应用^[49]。李硕^[19]采用数值模拟研究了超低温氯化钠水溶液冷冻小龙虾的过程,确定了 10% 的氯化钠水溶液和压力 0.03 MPa 条件下的介质冷冻方式,比传统冷冻速度提高了 20%,显著改善了小龙虾的冷冻质量。目前,专注于水产品中低温液态速冻技术的数值模拟尚少见报道,深入研究对确定水产冷冻适宜载冷剂、优化载冷剂组成、提高冷冻速率以及改善冻品质量具有重要意义。

4.2.2 传热传质机理研究 水产品液态速冻是典型的传热传质过程,肌肉组织的细胞结构相互连接,形成复杂的组织基质,使得冻结过程中的传热传质更为复杂^[50]。Fikiin 等^[15]以鲑鱼、竹荚鱼、鲱鱼为研究对象,设计了液体冷冻系统,确定了该冻结系统热传递系数高达 720~760 W/(m²·K)。但基于水产品种类的多样性和不同产品肌肉组织基质的复杂性,针对不同水产品液态速冻载冷剂的溶质渗透及传热机理研究仍需深入推进。

4.2.3 改进冷冻前处理方式 研究^[51]表明,在样品表面进行淀粉、果胶、壳聚糖、海藻酸盐等涂膜操作,可有效抑制载冷剂溶质渗透;直接浸渍冷冻前润湿样品,可在冻结过程中形成冰衣,限制载冷剂渗透;将原料预冷至 0℃ 或者是冰点,降低载冷剂温度也可减少样品与载冷剂间的传质。此外,预包装后液态速冻已被证实具有显著的保持冻品品质优势^[52]。改进样品冷冻前处理方式能够有效减缓载冷剂质量下降及溶质渗透问题,同时可以缓解载

冷剂温度过低时的龟裂现象,相关研究的持续深入对减少载冷剂对冻品品质的负面影响具有重要意义。

5 结语

低温液态速冻技术具有冻结效率高,有效减小冰晶造成的细胞损伤而提高冻品质量,易于实现单体速冻以及设备投资低、节省能耗等特点,在水产品冷冻加工应用中凸显了较大优势。直接浸渍、间接接触(预包装)以及结合其他辅助手段的液态速冻在水产品中得到较为广泛的研究应用。鉴于水产品种类的多样性和肌肉组织的差异性,开发适用于不同水产品冷冻的新型载冷剂和多元复配载冷剂,以及改进冷冻前处理方式是水产品低温液态速冻技术的重要发展方向之一。借助数值模拟、计算机仿真等技术快速筛选优化载冷剂组分、提升传热效率、改善冻品品质也将成为该技术的研究热点。此外,在液态速冻的基础上,结合其他物理辅助方式,如超声波、射频、电场、磁场或压力场等,进一步提高冷冻速度、减小冰晶尺寸、提高冻品质量,改进创新液态速冻机械设备,也将成为水产品液态速冻技术的重要发展趋势。随着低温液态速冻技术的不断完善,该技术的深入推广应用必将水产冷冻行业发展产生深远积极的影响。

参考文献

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 17-18.
- [2] 李学鹏, 刘慈坤, 王金厢, 等. 水产品贮藏加工中的蛋白质氧化对其结构性质及品质的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 319-325, 333.
- [3] 励建荣. 生鲜食品保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2010, 10(3): 1-12.
- [4] ZHAN Xi-ming, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(17): 2 925-2 938.
- [5] RODEZNO L A E, SUNDARARAJAN S, SOLVAL K M, et al. Cryogenic and air blast freezing techniques and their effect on the quality of catfish fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 377-382.
- [6] LI Dong-mei, ZHU Zhi-wei, SUN Da-wen. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 46-55.
- [7] 倪明龙. 浸渍冻结过程多元载冷剂的扩散性及其在鱼片中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 1-6.
- [8] 杨贤庆, 侯彩玲, 刁石强, 等. 浸渍式快速冻结技术的研究现状及发展前景[J]. 食品工业科技, 2012, 33(12): 434-437.
- [9] WU Xiao-fei, ZHANG Min, ADHIKARI B, et al. Recent

- developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(17): 3 620-3 631.
- [10] 杨志坚. 液氮速冻对舌鳎和梭子蟹品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 3-5.
- [11] LUCAS T, RAOULT-WACK A L. Immersion chilling and freezing in aqueous refrigerating media: Review and future trends: Refrigeration et congelation par immersion dans des milieux refrigerants; Revue et tendances futures[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1998, 21(6): 419-429.
- [12] ZORRILLA S E, RUBIOLO A C. Mathematical modeling for immersion chilling and freezing of foods Part I: Model development[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 66(3): 329-338.
- [13] ZARKADAS D M, MITRAKAS M. On the applicability of a plug flow immersion freezer: Theoretical considerations[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 1999, 32(8): 548-552.
- [14] 林婉玲, 曾庆孝, 朱志伟. 直接浸渍冷冻在食品加工中的应用现状与前景[J]. *食品工业科技*, 2008(7): 256-260.
- [15] FIKIIN K, TSVETKOV O, LAPTEV Y. Thermophysical and engineering issues of the immersion freezing of fruits in ice slurries based on sugar-ethanol aqueous solution[J]. *Ecolibrium*, 2003, 45(4): 10-15.
- [16] 董佳, 胡嘉杰, 王庆, 等. 液体浸渍冷冻对鲟鱼贮藏过程中品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 281-287.
- [17] 刘书来, 张振宇, 唐文燕, 等. 不冻液冻结乌鳢块冻藏过程中品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(1): 256-262.
- [18] BOONSUMREJ S, CHAIWANICHISIRI S, TANTRATIAN S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 292-299.
- [19] 李硕. 食品冷冻数值模拟及小龙虾超低温水介质速冻技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 36-53.
- [20] 辛美丽. 三元载冷剂性能及草鱼块浸渍冻结研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 1-2.
- [21] ZHANG Ming-cheng, NIU Hai-li, CHEN Qian, et al. Influence of ultrasound-assisted immersion freezing on the freezing rate and quality of porcine longissimus muscles[J]. *Meat Science*, 2018, 136: 1-8.
- [22] SHAIKH N I, PRABHU V. Mathematical modeling and simulation of cryogenic tunnel freezers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(2): 701-710.
- [23] 徐慧文, 谢晶, 汤元睿, 等. 金枪鱼盐水浸渍过程中渗透量及品质变化的研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(12): 349-353, 364.
- [24] LUCAS T, RAOULT A L. Immersion chilling and freezing: phase change and mass transfer in model food[J]. *Journal of Food Science*, 1996, 61(1): 127-132.
- [25] FIKIIN A G. New method and fluidized water system for intensive chilling and freezing of fish[J]. *Food Control*, 1992, 3(3): 153-160.
- [26] SHI Zhi-jia, ZHONG Sai-yi, YAN Wen-jie, et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111: 301-308.
- [27] 唐佳楣, 廖媛媛, 汤海青, 等. 不同冻结方法对大黄鱼冻藏期间品质的影响[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2019, 32(6): 35-42.
- [28] CAMPO-DEANO L, TOVAR C A, BORDERIAS J, et al. Gelation process in two different squid (*Dosidicus gigas*) surimis throughout frozen storage as affected by several cryoprotectants: Thermal, mechanical and dynamic rheological properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 107(1): 107-116.
- [29] LIU Jian-hua, FANG Chun-hua, LUO Ya-hong, et al. Effects of konjac oligo-glucomannan on the physicochemical properties of frozen surimi from red gurnard (*Aspitrigla cuculus*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 668-673.
- [30] 韩光赫. 直接浸渍冷冻载冷剂组成、传递特性及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 1-6.
- [31] 大连博缘科技有限公司. 一种小黄鱼快速玻璃化保鲜冷冻冷藏方法及专用冷冻液: 201410822498. X [P]. 2015-04-22.
- [32] 吴燕燕, 张涛, 李来好, 等. 不冻液处理对石斑鱼在常温物流过程中的品质和货架期的影响[J]. *水产学报*, 2019, 43(12): 2 574-2 583.
- [33] 中国水产科学研究院南海水产研究所. 一种食品直接浸渍冻结用的冻结液: 201210196843.4[P]. 2012-10-10.
- [34] YANG Fang, JING Dian-tao, DIAO Yu-duan, et al. Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 118: 108762.
- [35] 马晓斌, 林婉玲, 杨贤庆, 等. 浸渍式快速冷冻液的优化及冻结技术对脆肉鲩品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(18): 338-341, 346.
- [36] 李晓燕, 陈杰, 樊博玮, 等. 浸渍式冷冻技术的研究进展[J/OL]. *食品与发酵工业*. [2020-09-15]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024094>.
- [37] 李向阳. 大洋性围网鳗鱼船上冷盐水冻结保鲜与品质控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014: 6-8.
- [38] 侯彩玲. 浸渍式速冻技术的优化研究及其在对虾冷冻加工中的应用[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014: 62-64.
- [39] 黄刚, 娄永江, 王春琳. 低温液体速冻对软壳三疣梭子蟹冻藏期间肌肉生化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(11): 328-331, 358.

(下转第 217 页)

- extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 141: 111809.
- [53] 方婷, 段明慧, 马晋芳, 等. 高压破碎提取雨生红球藻中虾青素的工艺研究[J]. 中药材, 2018, 41(9): 2163-2166.
- [54] ZHANG Heng, TANG B K, ROW K H. A green deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted method to extract astaxanthin from shrimp byproducts[J]. Analytical Letters, 2014, 47(5): 742-749.
- [55] RODRIGUES L, PEREIRA C, LEONARDO I C, et al. Terpene-based natural deep eutectic systems as efficient solvents to recover astaxanthin from brown crab shell residues[J]. Acs Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(5): 2246-2259.
- [56] LEE Y R, ROW K H. Comparison of ionic liquids and deep eutectic solvents as additives for the ultrasonic extraction of astaxanthin from marine plants[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016, 39: 87-92.
- [57] 邱采奕. 超临界流体萃取技术及其在食品中的应用[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(2): 155, 157.
- [58] 张红英, 姚元虎, 颜雪明, 等. 超临界流体萃取分离技术及其应用[J]. 首都师范大学学报, 2016, 37(6): 50-53.
- [59] 张晓燕, 刘楠, 周德庆. 天然虾青素来源及分离的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 264-267.
- [60] CHENG Xiang, QI Zhen-bang, BURDYN T, et al. Low pressure supercritical CO₂ extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* demonstrated on a microfluidic chip[J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 481-485.
- [61] KHOO K S, CHEW K W, YEW G Y, et al. Integrated ultrasonic assisted liquid biphasic flotation for efficient extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67, 105052.
- [62] GAO Jing, FANG Chun-li, LIN Yong-zi, et al. Enhanced extraction of astaxanthin using aqueous biphasic systems composed of ionic liquids and potassiumphosphate[J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125672.
- [63] 张晔, 刘志伟, 谭兴和. 响应面法优化复合酶提取雨生红球藻中虾青素的工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 87-92.
- [64] HUANG Jin-jin, YANG Zhen, ZHU Rui-yan, et al. Efficient heterologous expression of an alkaline lipase and its application in hydrolytic production of free astaxanthin[J]. Biotechnology for Biofuels, 2018, 11(1): 181.
- [65] ZIELIRISKA-DAWIDZIAK M, MICHALAK M. Influence of magnetic field on extraction of model proteins in polyethylene glycol/magnesium sulfate aqueous two-phase system[J]. Journal of Chromatography B - Analytical Techniques in Biomedicine and Life Sciences, 2019, 1126/1127: 121760.
- [66] ZHAO Xiao-yan, ZHANG Xiao-wei, FU Li-dan, et al. Effect of extraction and drying methods on antioxidant activity of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* [J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 99: 197-203.
-
- (上接第 193 页)
- [40] SONG Yong-ling, LIU Lei, SHEN Hui-xing, et al. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. Food Control, 2011, 22(3/4): 608-615.
- [41] QIAN Pan, ZHANG Yi-qi, SHEN Qing, et al. Effect of cryogenic immersion freezing on quality changes of vacuum-packed bighead carp (*Aristichthys nobilis*) during frozen storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(6): e13640.
- [42] 史咏梅, 李勇勇, 吴迪迪, 等. 不同冻结方式对南美白对虾品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 94-100.
- [43] 梁钻好, 陈海强, 梁凤雪, 等. 液浸速冻对牡蛎水分迁移及品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 233-238.
- [44] SUN Qin-xiu, SUN Fang-da, XIA Xiu-fang, 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.
- [45] 向迎春, 黄佳奇, 栾兰兰, 等. 超声辅助冻结中国对虾的冰晶状态与其水分变化的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(2): 203-210.
- [46] 陈聪, 杨大章, 谢晶. 速冻食品的冰晶形态及辅助冻结方法研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 220-225.
- [47] CIPOLLETTI J C, ROBERTSON G H, FARKAS D F. Freezing of vegetables by direct contact with aqueous solutions of ethanol and sodium chloride[J]. Journal of Food Science, 1977, 42(4): 911-916.
- [48] PHAM Q T, LE BAIL A, HAYERT M, et al. Stresses and cracking in freezing spherical foods: A numerical model[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(4): 408-418.
- [49] 王金锋, 李文俊, 谢晶. 数值模拟在食品冻结过程中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 200-204.
- [50] LUCAS T, CHOURET J M, BOHUON P, et al. Freezing of a porous medium in contact with a concentrated aqueous freezant: Numerical modelling of coupled heat and mass transport [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(11): 2093-2106.
- [51] YU Da-wei, REGENSTEIN J M, XIA Wen-shui. Bio-based edible coatings for the preservation of fishery products: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2481-2493.
- [52] 张涛. 石斑鱼液体速冻保鲜加工技术及对鱼肉品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 9-11.