

流化冰在水产品保鲜中的应用研究进展

Research progress on application of slurry ice for aquatic products preservation

张皖君^{1,2} 蓝蔚青^{1,2} 肖蕾^{1,2} 赵宏强^{1,2} 谢晶^{1,2}

ZHANG Wan-jun^{1,2} LAN Wei-qing^{1,2} XIAO Lei^{1,2} ZHAO Hong-qiang^{1,2} XIE Jing^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

(1. College of Food Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing and Preservation, Shanghai 201306, China)

摘要:文章主要介绍近年来国内外对流化冰在水产品保鲜中的研究应用现状,通过与传统冰对比,系统分析流化冰的特点、制取方法及在食品保藏等领域的应用,并提出流化冰技术在水产品应用中存在的主要问题及改进建议,为今后进一步拓展流化冰的商业化应用提供理论依据。

关键词:流化冰;水产品;保鲜;研究进展

Abstract: In this paper, the research and application situation of ice slurry for the preservation of aquatic products in recent years at home and abroad were introduced. Compared with traditional ice, the characteristics, preparation method and the application of ice slurry in the field of food preservation were analyzed systematically. The main problem and suggestions for improvement were also given so as to expand the commercial application and provide the theoretical basis for slurry ice.

Keywords: slurry ice; aquatic product; preservation; research progress

与畜禽类食品相比,水产品中的蛋白质、水分和饱和脂肪酸含量高,肌肉组织较柔软,在贮藏、运输和销售过程中,易受机械损伤、酶类和微生物的影响,继而引起产品鲜度下降,加剧腐败变质^[1-2]。冰藏保鲜是水产品常用的低温保藏方法,其主要利用冰的融化吸热特性使鱼体处于低温状态,能较好控制其中心温度的波动,减少水分流失,有效抑制微生物生长和鱼体内源酶的活性,使产品质量接近鲜活鱼的

生物特性。与冷藏相比,冰藏可显著提高水产品的货架期,操作方便^[3-5]。传统应用的冰种主要有薄片冰、碎块冰、平板冰和管状冰等,虽然这些方法都能对延长水产品鲜度有一定效果,但由于传统冰的传热性能差,有尖锐棱角,无流动性,易对食品表面造成摩擦损伤,且淡水资源消耗大,也不适合用于直接接触冷却,故不是理想的冷藏介质^[6]。

为降低水产品处理与贮藏期间的品质损失,提高其经济价值,极有必要寻求一种具有高效低耗特性的冷却介质。流化冰又名二元冰、颗粒流冰、流体冰、冰浆、液冰等,是一种新型的制冷介质,其主要由海水或混合溶液(水与乙醇或丙二醇溶液)在冻结点温度以下产生的细小球形冰晶与液态溶液组成的浆状混合物。传统冰是利用冰水相变原理,是溶液的温度处于冰点以下直接冻结成固体冰块的静态制冰方法,而流化冰主要根据盐溶液的理化特性,当混合相中的水溶液在冷却到特定温度时,其中的水分就会结晶成具有流动性的球状冰粒,悬浮在两相混合物中^[7-9]。与传统冰相比,流化冰具有冰粒细小均一、冰体柔软光滑,流动性好,潜热值高等优点,可完全将鱼体浸没,达到绝氧效果,同时降低对鱼体的物理伤害^[10]。流化冰具有冰的载冷特性和水的流动性,超高的热转换能力和较大的表面积使其冷却速率较快,可实现远距离输送,降低泵的能耗,改善用冰过程中的卫生状况^[11]。此外,其还能隔绝鱼体与空气的直接接触,抑制微生物的生长。其与传统冰的优缺点见表 1。

流化冰技术的研究和在水产中的应用最早起源于加拿大,随着制冰设备的改进,目前流化冰已在美国、日本、加拿大等发达国家的鱼类加工等领域得到广泛应用^[12]。近年来,虽然中国部分高校,如浙江大学、中南大学与同济大学等相继开展了流化冰的流动特性、制冰方法及添加剂对制冰效率的影响等方面研究^[13-15],然而,流化冰技术仍处于起步阶段,人们对流化冰的认识还不够充分。

基金项目: 2014 年国家农业成果转化资金项目(编号: 2014GB2C000081);上海市科技兴农重点攻关项目(编号:沪农科政字[2015]第 4-12 号);上海市科委工程中心能力提升项目(编号:16DZ2280300)

作者简介:张皖君,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通讯作者:谢晶(1968-),女,上海海洋大学教授,博士,博导。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

蓝蔚青(1977-),男,上海海洋大学高级工程师,博士,硕导。E-mail: wqlan@shou.edu.cn

收稿日期: 2016-02-24

表1 流化冰与传统冰的基本性能比较

Table 1 Basic characteristic comparison of slurry ice with traditional ice

冰种	颗粒外形	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{t}^{-1}$)	冷却能力	流动性	能耗	设备体积	使用成本	终端装置 灵活性	与产品接 触效果
流化冰	圆形,冰粒 均匀光滑	15 000 左右	好	流动性好,可泵送	少	小,是其他制冰 设备的 1/3	低	可灵活移动	无缝隙,接 触 性好
薄片冰	薄片状,有 棱角	1 700 左右	较好	流动性较差,用管 道或输送带运送	中等	大	高	灵活性一般	接触性中等
碎冰	无规则,棱 角锋利	—	差	无流动性,用输 送带	多	大	高	灵活性差	有缝隙,接 触 性差
平板冰	片状较厚, 有棱角	700 左右	差	无流动性,用输 送带	多	大	高	灵活性差	有缝隙,接 触 性差
管冰	管状,棱角 光滑	450 左右	差	无流动性,用输 送带	多	大	高	灵活性差	有缝隙,接 触 性差

1 制备方法

连续制冰技术是流化冰发展的核心环节,其中常用到的制冰介质有过冷水和水溶液。冰晶颗粒直径大小与生成方法密切相关,制得的冰晶大小越均匀,流化冰的流动性能、散热特性就越好。

1.1 过冷水法制取

过冷水法制取流化冰是根据水溶液的相变原理,利用一些凝固点较低的液体载冷剂使水溶液快速降温,形成过冷状态^[16],过冷水是指在过冷却装置中温度低于冻结点但仍不结冰的状态之一^[17]。这种状态稳定性差,遇到外界干扰易被破坏,从中生成冰核,由此制得的冰浆呈细小球状、均匀分散。一般过冷水法制流化冰系统主要有过冷却系统、冷却水循环泵与储水槽等。过冷却器是系统连续制取流化冰的核心部件,一般是换热器。过冷水连续制得的流化冰分散性较好,释冷速度快,可应用于食品的预冷保鲜等方面。在实际应用中为避免冰体经管口进入过冷却器,破坏设备稳定性,可增加融冰装置,利用换热器融化循环液中的微小冰粒,保证过冷却器进口的通畅。另外,由于过冷水状态不稳定,在过冷却系统中易有晶体生成,会频繁发生堵塞现象,从而降低设备的生产效率,可向液相溶液中加入添加剂,降低水的冰点和冰体的聚集特性,阻止或延缓冰晶的重结晶^[18-19]。目前研究较多的化学添加剂主要有吐温系列^[20]、聚乙烯醇添加剂^[21]等。

1.2 真空法制取

真空法制备流化冰是依据水的三相点原理^[22],水的饱和温度与压力密切相关,在冰浆制取过程中系统始终维持在真空状态下,真空容器中的水溶液在低压状态下闪蒸吸热,此时水滴内部温度不均匀,处于非稳定状态,温度下降至过冷度点,有结晶出现,当温度处于三相点温度时,水滴完全结冰^[23-24]。目前已有学者开展真空制冰的相关研究,Isao Satoh 等^[25]根据真空装置的蒸发、冷冻原理研究了冷带输送系统的性能与不同温度下纯水滴在结冰过程中冰浆的变化。

孙冰洁^[26]通过研究真空喷雾制冷过程的传热传质过程,建立了真空制冰模型,为真空喷雾法制取流化冰的含冰率测定提供了研究思路。

1.3 海水制取

过冷水法、真空法等制取流化冰技术常用的制冷介质为过冷水或水溶液,其均以淡水为水源,造成淡水资源的过度浪费。直接利用海水制流化冰,既可节约能源,又能使海水资源得到充分利用。海水具有独特的理化特性,盐分含量高,利用萃取结晶原理可快速制取流化冰,在运行过程中海水释放的热量被制冷剂吸收,当海水温度低至一定程度时就会有冰晶生成,形成固液混合的两相溶液,实现连续高效制冰,装置操作方便、效率高,能有效保护环境与节约能源^[19]。程智明等^[27]对船用海水流化冰制取设备控制系统进行了研究,同时设计系统测定海水流化冰的含冰率,并完善方案解决冰堵和设备耗能问题。张柔佳等^[28]分析了海水流化冰装置的传热传质状况,结果表明:含冰率与海水温度、流量、盐度密切相关,适当减少海水进口温度、流量、或盐度值可显著提高海水流化冰的含冰率,且含冰率控制在 10%~15% 为最佳用冰方案;成核剂的使用可增加结晶率,缩短成核时间,从而降低设备能耗值。

1.4 盐水法制取

当海水资源取用不便时,也可利用氯化钠来制取流化冰,共晶盐相变材料在提高能源利用率的同时也减少了燃料对环境的破坏,氯化钠则是其中一种。其来源广泛,价格合理,具有较低的冷却度,常作为低温相变的蓄冷介质使用。有研究^[29-31]表明刮片式制取氯化钠溶液冰浆装置成冰效率高,当氯化钠浓度为 3%~5% 时,制取冰浆的能效系数可达到 1.9。氯化钠溶液的冰点明显低于纯水冰点,且只有在过冷状态下才会发生相变成核,氯化钠溶液的最大过冷度受冷却速率、盐水浓度、外部扰动等因素的影响,试验中氯化钠溶液过冷度可达到 1.5℃ 左右。但由于其含盐分高,对系统装置会造成一定腐蚀,这就需要提高制冰装置的耐腐蚀性能。K. Fumoto 等^[32]通过控制氯化钠溶液的温度和压力来探究

新的制冰方法,试验表明所得流化冰的性能参数与压力、试验初始温度密切相关,氯化钠水溶液的结晶度受压力影响,当压力较高时,氯化钠水溶液仍存在过冷状态,降低压力可控制过冷凝固现象,且流化冰的制冰速度会随着过冷度的上升呈指数增加。

2 流化冰技术在水产品保鲜中的应用

2.1 流化冰对水产品预冷的效果

Chapman^[33]于 1990 年将流化冰用于长须鲸的预冷研究,为深入研究流化冰在水产品预冷保鲜上的应用奠定基础,此后关于流化冰的船上预冷技术也有部分研究。流化冰由于其独特的冰晶粒子结构,比普通碎冰具有更高的降温性能和热交换能力,在水产品保鲜中可应用流化冰预冷作为前端工艺,能有效提高后续的生产加工效率。过冷是预冷处理的一种方式,通常将鱼体全部浸入冰浆中,隔绝鱼体与氧气的接触,增大热交换面积,使产品内部温度迅速下降,从而抑制细菌的生长,钝化腐败反应,减少鱼体营养物质的损耗,有效延长水产品的保鲜期。流化冰在预冷过程中,虽有少量冰融化,但冰的温度基本保持不变,因此流化冰适合应用于水产品的运输过程中,使鱼体保持在低温状态^[34-35]。过冷处理常被认为是一种延长食品货架期的有效途径,但有些学者^[36]却对此存在争议,提出针对不同品种的鱼过冷处理在某些质量指标上的作用存在弊端,同时指出过冷处理抑制腐败率的作用可能会受到贮存时间的影响,只有在达到一定贮藏期限时,流化冰过冷却作用才会充分发挥。

高红岩等^[37]将流化冰预冷与冰温贮藏相结合,研究其对新鲜鳕鱼片质量的影响。试验得出,流化冰预冷前处理在一定程度上可降低新鲜鳕鱼片冰温贮藏初期的 TVB-N 值,延长其货架期达 17 d,且具有良好品质。Sona 等^[38]用流化冰和片冰分别对澳洲肺鱼进行不同时间的冷却前处理,之后在 -20 ℃ 贮藏 20 d,发现两组鱼片在贮藏期间的质构参数均呈下降趋势,经片冰前处理鱼片的总活菌数、TVB-N 和 pH 值均比流化冰组高,蛋白质含量、水分含量显著低于流化冰组,表明流化冰可有效保持水产品的良好品质,延长其货架期。郭儒岳等^[39]以片冰为对照,研究了流化冰对大黄鱼的预冷却贮藏效果,结果得出使用流化冰将大黄鱼冷却至 0 ℃ 仅需 45 min,较片冰冷却用时减少 50%,且具有更低的预冷终温,温度 -1 ℃。贮藏过程中流化冰组货架期比片冰组延长了 6 d,保鲜效果显著。

值得注意的是,仅采用流化冰冷却预处理技术很难保证水产品加工和运往销售市场过程中的高品质。相关学者^[40-41]提出采用流化冰预冷与气调包装、真空包装等其他技术相结合的方法可有效解决这一难题,这为流化冰的发展起到推动作用。随着流化冰预冷技术的深入研究,在实际生产中流化冰预冷单元作为水产品加工、保鲜的前处理手段已应用于生产线上。

2.2 流化冰对水产品的控温效果

流化冰具有冰水两相的特性,在贮藏保鲜中其冰晶粒子的相转变过程会吸收热量,冰体维持在 0 ℃ 以下的状态,使

整个贮藏体系在较长时间内保持恒温不变,从而降低水产品的氧化与腐败速度,在加工和运输过程中起到良好的保鲜效果^[42]。其中 U. Erikson 等^[36]研究了流化冰对鲜活大西洋鲑鱼的预冷处理效果及对整鱼和鱼片质量的影响,通过模拟实际运输流程,发现在运输第 4 天时,流化冰预冷处理组、连续贮藏组与传统冰处理组对比无明显优势,而在超市贮藏到第 11 天时,流化冰预冷组的优势在鱼样质地与品质上得到体现。流化冰预冷处理使鱼样温度在运输中始终保持在 0 ℃ 以下,可降低短距离运输中的用冰量,减少运输成本。虽然流化冰预冷对鲑鱼片的外观保持作用不大,但却可作为降低鱼片腐败率的有效手段。

2.3 流化冰对水产品贮藏品质的影响

流化冰除可快速预冷水产品,使其温度保持恒定外,也可在贮藏期间保持样品表面处于湿润光滑的状态,避免体表干化,保持产品的外观品质。同时,贮藏过程中融化后的冰浆还可冲洗去除鱼体表面的杂质、微生物等外界污染物,起到部分抑菌保鲜的作用,使产品处于较新鲜的状态。目前,流化冰因其独特的优势而在水产品保鲜市场中得到迅速发展。Vanesa 等^[43]以竹荚鱼为研究对象,观察流化冰对其理化变化的抑制效果,结果表明流化冰对竹荚鱼贮藏期间核苷酸自溶、脂肪水解氧化、非酶褐变等均有一定抑制作用。Zhang Bin 等^[44]以片冰为对照,研究了流化冰对冷藏过程中新鲜鲢鱼蛋白质功能特性的影响,结果表明流化冰处理组肌肉的弹性和咀嚼性均优于对照组,肌原纤维蛋白含量、Ca²⁺-ATP 酶活性和总巯基含量显著高于片冰组,流化冰可有效阻止肌纤维蛋白降解退化,对结构组织的稳定有积极作用。曹少谦等^[45]比较了流化冰与片冰对银鲳的保鲜效果,结果得出两者均有抑菌作用,还可延缓 pH 值与 TVB-N 值的上升。采用流化冰贮藏的银鲳的菌落总数、大肠菌群、pH 值和 TVB-N 值均显著低于片冰组,感官结果也显示流化冰组银鲳品质明显优于片冰组,货架期比片冰组延长了 2 d。

2.4 流化冰在水产品远洋运输中的应用

水产品从前期捕捞、运输到后期加工销售,并非处于完全静止状态,流通运输中的摩擦撞击、污水侵染与较高的船上温度等均会加速水产品的腐败进程。因此,有必要研究模拟动态运输过程中流化冰处理对鱼体的保鲜效果。推动动态流化冰的船上保鲜技术发展,对远洋渔获物,尤其是剑鱼、金枪鱼与鲨鱼等高价值海产品具有明显的经济效益^[46]。Hanne 等^[47]研究流化冰对两种状态下养殖大西洋鲑鱼的质量影响,通过模拟流通鲑鱼从捕捞到商场的流通过程,发现流化冰预冷可快速降低鱼体温度。用流化冰先预冷 1 d 后再冰藏 7 d 的鲑鱼,其质量明显低于连续用流化冰处理组样品,在商场贮藏 14 d 后,经流化冰预冷处理的鱼样与传统冰连续贮藏组相比,具有较低的微生物活性,且鲜度状态保持最好。袁鹏翔等^[48]以鲑鱼为研究对象,探究动态流化冰模拟船上运输保鲜鲑鱼的效果,将鲑鱼贮藏在 40 r/min、-4 ℃ 的摇床中,通过对感官、理化性质及微生物等指标的测定分析,发现相对于冰水混合、碎冰与冰箱组,流化冰能显著减缓

鱿鱼的腐败变质速率,延长货架期,满足鱿鱼远洋运输的要求。林雪^{[49]25-39}模拟船上运输过程,研究了流化冰对鲑鱼的保鲜效果,结果显示与碎冰相比,流化冰可在短时间内降低鱼体温度。流化冰组样品在第20天时接近货架期终点,货架期延长8~12 d;另外,流化冰对TVB-N值、TBA值及菌落总数均有很好的抑制作用,使鲑鱼的鲜度水平显著提升。目前,流化冰已在一些国家的沿海鱼类加工场和远洋捕鱼舰队得到应用。

3 总结与展望

流化冰技术在冷藏保鲜方面展现了其特有优势,尤其是在鱼类冷藏保鲜中的优势尤为突出。但对于一些温带鱼类和多脂鱼类,单一用流化冰处理的效果与传统冰对比并不显著,未能达到预期效果。为充分发挥流化冰的优势,获得全面有效的抑菌保鲜效果,应将其与不同类型保鲜剂复配或其它保鲜手段相结合,以此延长货架期,实现为消费者提供更安全、健康食品的目的。目前研究较多的是将流化冰与臭氧结合,借助臭氧氧化能力强、杀菌和降解有机物的特点,将其与流化冰结合制成的臭氧冰,除能保持臭氧原有的优良特性外,还兼有环保经济、使用方便的优点,是水产品保鲜的重要途径之一^[50-51]。此外,采用冰温技术或结合防黑剂(4-HR)与抑菌剂(稳定态二氧化氯(ClO₂))等处理方式,均可与流化冰结合延缓水产品劣变及腐败程度,促进流化冰在水产品保鲜技术领域中的发展^[52-54]。

同时,流化冰的含冰量、温度与含盐浓度等还会影响水产品的保鲜效果。流化冰动态制取随机性大,稳定性较低,采用不同的方法得到流化冰的颗粒大小、流动性和物性也有差异^[55],因此实际应用中应根据不同的产品选择最优方案,避免一些外来因素对试验造成干扰^[25]。水产品保鲜中,海水和盐水是制冰最常用的二元混合溶液,冷藏中要注意盐分对水产品的影响。当流化冰的盐水比例不同时,贮藏期间鱼体的含盐量也会有所变化,尤其是对盐分较敏感的高值鱼。因此,实际应用中应根据不同保藏鱼样选择合适的盐水比例,并采取相应可行的措施减少盐分对产品的影响^[46]。再次,流化冰在实际应用中易融化,尤其在贮藏后期,冰融速度加快,会使鱼体沉积在容器底部,相互间发生摩擦,造成划伤,因此冷却鱼时还需定期留意其总冰量。此外,融化的冰水会溶解部分微生物和化学反应生成的代谢产物,若不及时排除冰水,将会造成鱼体和冰的交叉污染。因此,为避免这种现象的发生,贮藏期间应排净融化的冰水,并定期更换流化冰^{[49]34-40}。

总之,随着对流化冰特性研究的逐渐深入和制冰技术的逐步完善,其应用领域也在不断拓展。流化冰作为绿色高效的保鲜介质,对中国节能减排方针、走可持续发展道路的贯彻执行有着重要意义。

参考文献

[1] 林洪. 水产品保鲜技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 64-70.

- [2] 胡金鑫, 李军生, 徐静, 等. 水产品鲜度表征与评价方法的研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(3): 225-227.
- [3] 黎柳, 谢晶. 水产品冰鲜技术的研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 259-262.
- [4] 王倩, 孙晓红, 蓝蔚青, 等. 保鲜冰在水产品保藏中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 226-230.
- [5] 包玉龙, 汪之颖, 李凯凤, 等. 冷藏和冰藏条件下鲫鱼生物胺及相关品质变化的研究[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3): 157-162.
- [6] BEGONA Mugic, JORGE Barros-Velazquez, JOSE M Miranda, et al. Evaluation of a slurry ice system for the commercialization of ray (*Raja clavata*): Effects on spoilage mechanisms directly affecting quality loss and shelf-life [J]. LWT- Food Science and Technology, 2008, 41(6): 974-981.
- [7] KAUFFELD M, WANG M J, GOLDSTEIN V, et al. Ice slurry applications [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1491-1505.
- [8] 刘圣春, 王飞波, 严忠辰, 等. 流化冰技术及其在食品保鲜等领域的应用[C]//中国制冷学会2009年学术年会论文集. 天津: 中国制冷学会2009年学术年会, 2010: 18-21.
- [9] 高萌, 张宾, 邓尚贵, 等. 流化冰保鲜技术在食品工业中的应用进展[J]. 食品工业, 2014, 35(2): 178-181.
- [10] 刘圣春, 李叶, 饶志明. 冰浆性能分析及其在食品冷冻冷藏中的应用[J]. 食品工业, 2013, 34(5): 152-156.
- [11] HUIDOBRO A, MENDES R, NUNES M L. Slaughtering of gilthead seabream (*Sparus aurata*) in liquid ice: Influence on fish quality [J]. European Food Research and Technology, 2001, 213(4): 267-272.
- [12] CAMPOS C A, RODRIGUEZ O, LOSADA V, et al. Effects of storage in ozonised slurry ice on the sensory and microbial quality of sardine (*Sardina pilchardus*) [J]. International Journal of Microbiology, 2005, 103(2): 121-130.
- [13] 赵美, 于航. 冰浆贮存的均匀性研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 98-102.
- [14] 江敏, 张学军, 王炜. 直接接触式冰浆生成器单气泡传热数值模拟[J]. 低温工程, 2014(2): 19-23.
- [15] 徐爱祥, 刘志强, 赵腾磊. 冰浆存储过程中冰晶粒径动力学演化影响因素[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(8): 3138-3144.
- [16] 马军. 真空法制取冰浆[D]. 济南: 山东大学, 2013: 1-61.
- [17] 何国庚, 吴锐, 柳飞. 过冷水法冰浆制取的实验设计与分析[J]. 制冷技术, 2006, 34(4): 303-307.
- [18] INADA T, ZHANG Xu, YABE A, et al. Active control of Phase changes from super cooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(23): 23-45.
- [19] 宁静红, 刘圣春, 王飞波. 流化冰技术及其未来发展[C]//第六届全国制冷空调新技术研讨会论文集. 武汉: 第六届全国制冷空调新技术研讨会, 2010: 36-40.
- [20] INADA T, YABE A, GRANDUM S, et al. Method and apparatus for thermal transportation using polyvinyl alcohol: Europe, 1055719 [P]. 2004-05-12.

- [21] LU Shu-shen, INADA T, YABE A, et al. Microscale study of poly (vinyl alcohol) as an effective additive for inhibiting recrystallization in ice slurries [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(5): 562-568.
- [22] LIU Lu, BI Qin-cheng, LI Hui-xiong. Experimental investigation on flash evaporation of saltwater droplets released into vacuum [J]. Microgravity Science and Technology, 2009, 21: 255-260.
- [23] 章学来, 李志伟, 王伟, 等. 真空环境下的二元冰制备特性研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 128-132.
- [24] 李鹏辉. 蒸发式过冷水法制冰浆的模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2013: 1-62.
- [25] SATOH I, SAITO T. Performance of the cold transport system utilizing evaporation-freezing phenomena with a cold trap[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(3): 255-263.
- [26] 孙冰洁. 真空法制备冰浆的数值模拟和理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2013: 1-56.
- [27] 程智明. 船用海水流化冰制取设备控制系统的研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015: 1-49.
- [28] 张柔佳. 成核剂对渔船用海水流化冰制备过程的节能研究[D]. 浙江: 浙江海洋学院, 2014: 1-59.
- [29] 宋力钊, 刘圣春, 饶志明. 氯化钠冰浆系统的试验研究[J]. 流体机械, 2013, 41(10): 65-68.
- [30] FARID M M, KHALAF A N. Performance of direct contact latent heat storage units with two hydrated salts [J]. Solar Energy, 1994, 52(2): 179-189.
- [31] 李兴仁, 童明伟, 吴碧容. 共晶盐低温蓄冷材料的试验[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(8): 114.
- [32] FUMOTO K, SATO T. Ice slurry generator using freezing-point depression by pressurization-Case of low-concentration NaCl aqueous solution [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 795-800.
- [33] CHAPMAN L. Making the grade: Ice slurries get top marks for quality products [J]. Australian Fisheries, 1990(7): 16-19.
- [34] KILINC B, CAKLI S, CADUN A, et al. Comparison of effects of slurry ice and flake ice pretreatments on the quality of aquacultured seabream (*Sprusaurata*) and seabass (*Dicentrarchus labrax*) stored at 4 °C [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1 611-1 617.
- [35] PINEIRO C, BARROS-VELAZQUEZ J, AUBOURGA S P. Effects of newer slurry ice systems on the quality of aquatic food products: a comparative review versus flake-ice chilling methods [J]. Trends in Food Science and Technology, 2004, 15(12): 575-582.
- [36] EIRKSON U, MISIMI E, GALLART-JORNET L. Superchilling of rested Atlantic salmon: Different chilling strategies and effects on fish and fillet quality [J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1 427-1 437.
- [37] 高红岩. 流化冰预冷与冰温贮藏新鲜鳕鱼片质量特性分析研究 [J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 48-52.
- [38] SONAY Z, RAVI F, DAVID P. The effects of two forms of ice on microbiological and physicochemical properties of Barramundi (*Lates calcarifer*, Bloch) fillets [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2 886-2 896.
- [39] 郭儒岳, 凌建刚, 叶宇飞. 流化冰超冷却对养殖大黄鱼贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(08): 307-312.
- [40] HANSEN A, RUDI K. The combined effect of superchilling and modified atmosphere packaging using CO₂ emitter on quality during chilled storage of pre-rigor salmon fillets (*Salmo salar*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(10): 1 625-1 633.
- [41] DUUN A S, RUSTAD T. Quality of superchilled vacuum packed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets stored at -1.4 and -3.6 °C [J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 122-133.
- [42] 高萌, 张宾, 王强, 等. 流化冰保鲜对鲑鱼蛋白质功能特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 304-309.
- [43] VANESA Losada, CARMEN Pineiro, JORGE Barros-Velazquez, et al. Inhibition of chemical changes related to freshness loss during storage of horse mackerel (*Trachurus trachurus*) in slurry ice [J]. Food Chemistry, 2005, 93(4): 619-625.
- [44] ZHANG Bin, DENG Shang-gui. Effect of slurry ice on the functional properties of proteins related to quality loss during skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) chilled storage [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(4): 695-702.
- [45] 曹少谦, 戚向阳, 袁勇军, 等. 片冰和流冰对银鲳保鲜效果的比较研究[J]. 核农学报, 2013, 27(9): 1342-1347.
- [46] 王名坚. 颗粒流冰在鱼类保鲜中的应用[J]. 渔业现代化, 2000(3): 8-11.
- [47] HANNE Digre, ULF Erikson, IDA G Aursand. Rested and stressed farmed atlantic cod (*Gadus morhua*) chilled in ice or slurry and effects on quality [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): 89-100.
- [48] 袁鹏翔. 流化冰对鲈鱼的保鲜研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015: 1-69.
- [49] 林雪. 鲈鱼流化冰保鲜技术研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.
- [50] GUZEL-SEYDİM Z B, GREENE A K, SEYDİM A C. Use of ozone in the food industry [J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(4): 453-460.
- [51] 徐泽智, 刁石强, 郝淑贤, 等. 用臭氧冰延长水产品保鲜期的试验[J]. 制冷学报, 2008, 29(5): 58-62.
- [52] 孙天利, 武俊瑞, 岳喜庆. 冰温技术在食品领域中的应用研究 [J]. 农业科技与装备, 2013(2): 54-58.
- [53] SANTIAGO P Aubourg, VANESA Losada, MARTA Prado, et al. Improvement of the commercial quality of chilled Norway lobster (*Nephrops norvegicus*) stored in slurry ice: Effects of a preliminary treatment with an antimelanotic agent on enzymatic browning [J]. Food Chemistry, 2007, 103(3): 741-748.
- [54] 冯家敏, 张宾, 王强. 流化冰结合防黑剂、抑菌剂对南美白对虾的保鲜效果[J]. 食品科学, 2016(2): 244-249.
- [55] 何国庚, 吴锐, 柳飞. 冰浆生成技术研究进展及实验初探[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(4): 22-34.