

超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉品质的影响

田浩杨, 缪文华*, 徐京, 张俊杰, 徐婕, 赵亚东, 杨红丽, 郑斌*

(浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316022)

摘要: 以冻结方式和冻藏温度作为变量, 探究超低温冷冻和冻藏对贻贝冻藏期间品质的影响。在6周的冻藏过程中, 相较于冰箱慢速冻结和-20℃冻藏, 贻贝经液氮快速冻结并在-30℃下冻藏解冻损失(22.58%), 水分含量(76.61%)优于其他组, 且感官评价最好, 保持着良好的弹性(0.52 mm)和咀嚼性(5.64 mJ)。在冻藏期间, 贻贝的TVB-N值和菌落总数不断上升, pH值不断降低, 经液氮快速冻结并在-30℃下冻藏, 贻贝的TVB-N值为12.2 mg/100 g, 菌落总数为32 CFU/g, 显著低于其他三组($P<0.05$), 贻贝的pH值(7.32)和色度 L^* (66.18)值均高于其他三组。经液氮快速冻结后在-20℃下冻藏的贻贝肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase(345.21 IU/L)活性较其他组最高, 弹性(0.59 mm)和咀嚼性(6.86 mJ)高于其他三组。综上所述, 该研究采用液氮对贻贝进行速冻可以有效改善冻藏贻贝的品质, 较低的贮藏温度可以一定程度改善冻藏贻贝的品质, 将为贻贝超低温保鲜提供理论支持。

关键词: 贻贝; 冻藏; 液氮速冻; 超低温; 品质特性

文章编号: 1673-9078(2025)01-113-122

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1403

Effects of Ultra-low Temperature Freezing and Frozen Storage on the Meat Quality of Cooked Mussel

TIAN Haoyang, MIAO Wenhua*, XU Jing, ZHANG Junjie, XU Jie, ZHAO Yadong, YANG Hongli, ZHENG Bin*

(Department of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: In this study, the effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on the quality of mussels during frozen storage were explored by taking the freezing method and frozen storage temperature as variables. During the 6-week freezing process, compared with the slow freezing in the refrigerator and the freezing at -20℃, the mussels were quickly frozen in liquid nitrogen and thawed at -30℃, resulting in a loss of 22.58%, a higher moisture content (76.61%) as compared with the other groups, and the best sensory scoring while maintaining good elasticity (0.52 mm) and chewiness (5.64 mJ). During the frozen storage period, the TVB-N value and total bacterial count of the mussels continued to increase, whilst the pH continued to decrease. After rapid freezing in liquid nitrogen and frozen storage below -30℃, the TVB-N value of mussels was 12.2 mg/100 g, and the total bacterial count was 32 CFU/g, which were significantly lower than those of the other three groups ($P<0.05$). The pH value (7.32) and color L^* value (66.18) of mussels were higher than those of the other three groups. Compared with the other groups, the Ca^{2+} -ATPase (345.21 IU/L) activity of the myofibrillar protein in the

引文格式:

田浩杨, 缪文华, 徐京, 等. 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 113-122.

TIAN Haoyang, MIAO Wenhua, XU Jing, et al. Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on the meat quality of cooked mussel [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(1): 113-122.

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 浙江省“三农九方”农业科技协作计划项目(2023SNJF061); 国家重点研发计划项目(2021YFD2100504)

作者简介: 田浩杨(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1484511336@qq.com

通讯作者: 缪文华(1983-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 海洋蛋白质资源综合利用与精深加工, E-mail: miaowenhua@zjou.edu.cn; 共

同通讯作者: 郑斌(1968-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 水产品保鲜加工与营养健康, E-mail: zhengb@zjou.edu.cn

mussels frozen at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ after rapid freezing in liquid nitrogen was the highest, with higher elasticity (0.59 mm) and chewiness (6.86 mJ). In summary, using liquid nitrogen for quick freezing of mussels can effectively improve the quality of frozen mussels, and a lower storage temperatures can improve the quality of frozen mussels to a certain extent, which will provide theoretical support for ultra-low temperature preservation of mussels.

Key words: mussels; frozen storage; liquid nitrogen quick freezing; ultra-low temperature; quality characteristics

贻贝, 又叫“淡菜”“虹口”, 是我国沿海地区常见的海洋生物, 也是一种重要的海产品^[1], 其富含蛋白质、矿物质和多种营养成分, 具有很高的营养价值和经济价值^[2]。然而, 由于天然贻贝的含水量较高, 其采捕、运输、贮藏等环节存在诸多问题, 如贻贝易腐败、易变质, 在贮藏过程中极易发生品质劣变^[3]。对贻贝进行冷冻保藏是一种重要的加工处理方式。冷冻保藏可有效地抑制致病菌、腐败菌的生长, 延长贻贝的保质期, 最大限度的保持贻贝的营养价值不变, 从而提高其经济价值和市场竞争力, 保证市场均衡供应^[4]。

在水产品的冻藏加工中, 冷冻技术起着关键作用。传统的冷冻方法通常采用慢速冷冻^[5], 但是慢速冷冻冻藏过程中生成的冰晶会导致贻贝的肉质老化, 从而造成肉质持水能力降低, 随着冻藏时间的延长, 贻贝肌肉细胞受损、蛋白质变性, 解冻后汁液流失增加, 导致其风味及口感下降, 使得冻品质量显著降低^[6,7]。为了提高冻藏水产品质量, 保持其新鲜度, 目前有许多通过改变冷冻条件处理水产品从而发挥更好保鲜效果的研究。在冻藏加工中, 不同的冷冻条件(如改变冻藏环境、添加浸渍溶液等)对贝类产品的品质有着不同的影响^[8]。液氮快速冷冻技术是一种常用的食品和生物样本冷冻方法, 利用液氮迅速将物质冷冻至极低温的过程。这种技术可以快速降低水产品的温度, 从而实现快速冷冻并保持水产品的质量和营养活性^[9-11]。在食品保鲜方面, 其快速降温的特性可以延缓冰晶生长的速率, 有效地保持肉品的品质和新鲜度, 这对于供应链管理和物流运输至关重要, 降低了食品在运输过程中的损耗和浪费, 提高了经济效益。此外, 采用液氮速冻技术处理水产品可以影响其菌群结构。通过快速冷冻可以减少微生物的繁殖和活动, 从而延缓水产品的腐败过程。由于其冷冻效果和保鲜特性, 食品可以跨越地理限制, 进入更广阔的市场, 增加出口收入和国际竞争力。液氮速冻技术现已成为一种重要的水产品保鲜方法, 为食品的冷冻和保鲜提供了可靠的解决方案, 推动了相关产业的发展和可持

续增长^[10,12]。因此, 本文通过对比液氮速冻及常规冷冻两种冷冻方式对贻贝进行冻结, 同时研究不同冻藏温度对贻贝品质的影响, 以期达到改善冻藏贻贝品质, 延长贻贝货架期的目的, 为提高冻品质量提供科学依据和解决途径。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜厚壳贻贝, 购于浙江省舟山市国际水产城。贻贝采购后放置于 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 保持贻贝鲜活状态, 于 20 min 内运回实验室。

氧化镁、硼酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、乙醇等均为分析纯, 国药化学试剂有限公司; Ca^{2+} -ATPase 活性试剂盒, 江苏酶免实业有限公司。实验用水均为蒸馏水。

1.2 仪器与设备

DW-30L508 医用低温保存箱, 成都壹科医疗器械有限公司; HYCD-469 医用冷藏冷冻箱, 青岛海尔生物医疗股份公司; ATY224 电子天平(精度为 0.1 mg), 日本岛津制作所; RCD-1A 高速均质乳化机, 杭州旌斐仪器科技有限公司; H1750R 高速台式冷冻离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; FE28 pH 计, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; KDN-816 全自动凯氏定氮仪, 上海纤检仪器有限公司; iTexture 质构仪, 浙江浙科仪器设备有限公司; DS-200 全自动色差仪, 杭州彩谱科技有限公司; L90 高压灭菌器, 德国爱安姆科技有限公司。

1.3 实验步骤

选择颗粒饱满, 大小体积一致的厚壳贻贝, 挑选出死贝、空贝, 进行清洗。然后, 将贻贝蒸汽开壳处理 1 min, 开壳后常温冷却 10 min, 对贻贝取肉, 去除足丝, 洗净残留的杂质。最后, 将贻贝放在干净的滤网上, 沥干水分。常规冻藏组直接将贻贝存入相应温度冰箱中冻结冻藏; 液氮速冻组将贻贝放

置于铁板上,并移至泡沫箱中,向泡沫箱内倾倒液氮使贻贝浸泡于液氮中速冻处理,每只贻贝肉速冻30 s左右使贻贝中心温度达到 -20°C ,后装于自封袋放入冰箱冻藏。冻藏过程中,每隔1周取样1次,整个贮藏周期为6周。实验组见表1。

表1 实验分组

Table 1 Experimental group

分组	冷冻和冻藏条件
第I组(对照组)	贻贝存入 -20°C 冰箱进行冻结并冻藏
第II组	贻贝存入 -30°C 冰箱进行冻结并冻藏
第III组	贻贝经液氮速冻后存入 -20°C 冰箱冻藏
第IV组	贻贝经液氮速冻后存入 -30°C 冰箱冻藏

1.4 冻藏贻贝品质检测方法

1.4.1 解冻损失率测定

将贻贝从冰箱取出后,迅速进行称重,记录解冻前的质量,然后将贻贝置于室温中解冻2 h,待贻贝完全解冻后,用吸水纸拭去贻贝表面水分,称取贻贝解冻后的质量,按公式(1)计算解冻损失率:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A —解冻损失率, %;

m_1 —解冻前贻贝质量, g;

m_2 —解冻后贻贝质量, g。

1.4.2 水分含量测定

将贻贝从冰箱中取出,于室温下自然解冻后,参照GB 5009.3-2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》采用直接干燥法测定贻贝中的水分含量。

1.4.3 质构特性分析

采用TMS-Pro物性分析仪,测定解冻后贻贝肉的质构特性。二次挤压测定参数为:选用P/50平底柱形探头,测试速率1.0 mm/s,样品压缩形变量30%,测试力为0.6 N。

1.4.4 感官评价

根据GB 2733-2015《食品安全国家标准鲜、冻动物性水产品》中感官要求,并作修改,制定冻藏贻贝的感官评分标准,见表2。由6名经过训练的感官评价成员组成感官评定小组,待冻藏贻贝样品解冻后对样品质地、滋气味、外观及色泽进行评价打分。

表2 贻贝感官评价标准

Table 2 Criteria for sensory evaluation of mussel

项目	得分标准
质地	贝肉形状完好,肉质紧密有弹性(16~20分)
	贝肉形状较好,肉质紧密,弹性较好(10~15分)
	贝肉形状一般,肉质弹性稍差(1~9分)
滋气味	具有贻贝固有的鲜甜味,贝柱鲜嫩,贝肉鲜香(16~20分)
	有贻贝固有的鲜甜味,贝柱较鲜嫩,贝肉无异味(10~15分)
	尚有贻贝固有的鲜嫩感,贝柱较鲜嫩,无异味(1~9分)
外观及色泽	贝肉呈其固有的色泽,色泽一致,无变色,无干耗(16~20分)
	贝肉呈其固有色泽,色泽基本一致,基本无变色,无干耗(10~15分)
	贝肉色泽较差,色泽不一致,有变色,干耗(1~9分)

1.4.5 TVB-N值的测定

参照GB 5009.228-2016《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》中自动凯氏定氮仪法,准确称量一定的解冻后贻贝样品,用全自动凯氏定氮仪测定样品中的TVB-N值。

1.4.6 菌落总数测定

参照GB 4789.2-2022《食品安全国家标准食品微生物检验菌落总数测定》来对冻藏贻贝进行菌落总数测定。

1.4.7 肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性的测定

采用ATPase试剂盒测定肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性。按照说明书上的测定规范进行标准品的稀释、样品的稀释、温育、洗涤、加酶、避光显色等操作,最后根据标准曲线计算 Ca^{2+} -ATPase活性。

1.4.8 pH值的测定

参照GB 5009.237-2016《食品安全国家标准食品pH值的测定》,并略作调整。称取10 g解冻后的贻贝样品,加入100 mL蒸馏水,用均质机高速均质至匀浆状态,然后用离心机以2 000 r/min的速度对匀浆离心10 min,取上清液,利用pH计测定上清液pH值。

1.4.9 色差的测定

贻贝于室温自然解冻,用吸水纸擦净贻贝表面水分,用标准白校准器和黑校准器进行校准,全自动色差计测定贻贝表面亮度,重复测量三次,取平均值。

1.4.10 数据分析

数据均采用 Microsoft Excel 2016 整理, 采用 SPSS 22.0 软件进行显著性分析, 结果以平均值 ± 标准差表示, 采用 Origin 2021 制图, 每组实验至少重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉解冻损失率的影响

解冻损失率是指食品在解冻过程中所失去的重量占总重量的比例, 是一种常用的保鲜指标^[13]。解冻损失率高低可以反映食品在冷冻、冷藏、解冻过程中所受到的影响, 从而对食品的品质和口感进行评估^[14]。高解冻损失率可能会导致食品的质量下降, 口感变差; 低解冻损失率通常意味着食品在冷冻、冷藏和解冻过程中的质量变化较小, 可以反映食品较好的保鲜性能。

由图 1 可知, 样品的解冻损失率均随着冻藏时间的延长而增加, 在冻藏第 6 周时, 第 I、II、III、IV 组的解冻损失率分别为 27.61%、26.48%、26.24%、22.58%, 第 I 组冻藏贻贝解冻损失率较第 0 周解冻损失率增加了 18.86%, 而第 II 组、第 III 组和第 IV 组的解冻损失率分别较第 0 周解冻损失率增加了 18.16%、17.76% 和 15.11%, 第 IV 组在整个冻藏过程中解冻损失率均比其他三组要低, 这可能是贻贝在冻藏过程中, 冰晶的形成和生长破坏了贻贝肉的纤维结构, 更多的结合水和不易流动水冻结成冰晶析出, 使其保水能力下降, 在解冻时将损失水分和水溶性结构。随着冻藏时间的延长, 在 -20 °C 冻藏温度下形成的冰晶更大, 其对贻贝肉的肌肉纤维破坏作用更强, 因此在解冻时水分流失可能更多, 从而增加了解冻损失率^[15,16]。在冻藏至第 3 周时, 第 IV 组解冻损失率较前一周显著增加 ($P < 0.05$), 增加了 5.90%, 第 I、II、III 组分别增加 4.58%、4.44%、4.17%。在冻藏第 4 周, 第 IV 组解冻损失率较前一周变化不大, 增加了 0.28%。在冻藏第 4 周后, 第 IV 组解冻损失率再次快速上升, 至冻藏第 6 周共增加 4.96%^[17]。

液氮速冻可以迅速将食品表面和内部温度降到极低温度, 快速形成众多较小的冰晶, 较小的冰晶有利于减少对贻贝组织结构和细胞膜造成的机械损伤。相比之下, 未经液氮处理的贻贝由于在冻结时冻结速率较慢, 贻贝肌肉内部结构将形成较大冰晶,

这会刺破肌肉组织, 导致膜内外水外流, 损失更多水分, 从而导致解冻损失率更高。

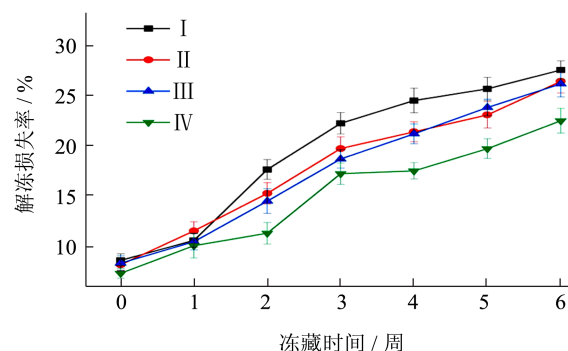


图 1 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉解冻损失率的影响

Fig.1 Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on thawing loss rate of cooked mussel

2.2 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉水分含量的影响

不同冷冻条件对冻藏贻贝水分含量的影响见图 2。在冻藏期间, 各组贻贝的水分含量均不断降低, 冻藏于 -30 °C 的贻贝水分含量显著高于冻藏于 -20 °C 的贻贝 ($P < 0.05$), 表明于更低温度下冻藏, 肉类的水分含量将更高^[18]。在同一冻藏时间内, 第 II、III、IV 组的水分含量均比第 I 组的贻贝高。在经过 6 周的冻藏时间后, 第 I 组水分含量最低, 为 63.9%; 第 IV 组水分含量最高, 为 76.61%; 第 I、II、III、IV 组水分含量与第 0 周相比分别降低了 11.92%、7.43%、9.56%、7.06%。水分含量下降幅度大小为 I > III > II > IV。

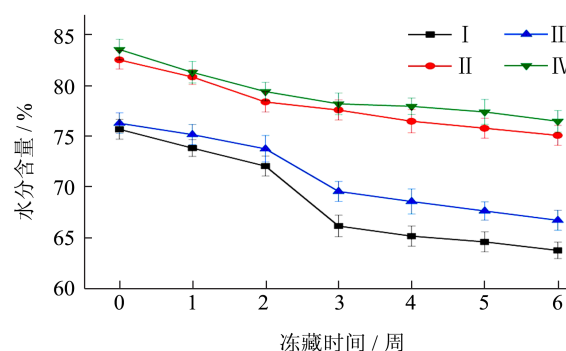


图 2 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉水分含量的影响

Fig.2 Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on moisture content of cooked mussel

在低温下, 水分会结成冰晶, 这可能会导致贻贝组织的破坏^[19]。在更低的温度下, 水分结晶的速率更快, 因此与 -20 °C 的环境相比, 在 -30 °C 的环境下, 水分结晶的速度更快, 导致结晶更细

小,对贻贝的组织破坏也就更小,其水分流失也就更小;液氮温度非常低,可以迅速将贻贝表面和内部温度降低,达到快速冷冻的目的。液氮处理贻贝可以减少水分结晶的时间,使得水分结晶更加细小,这些微小冰晶对贝类的细胞膜破坏不大,贻贝肉中的自由水得到了保留,水分流失少,有效减少了冻结过程中的水分流失^[20]。由此可知,液氮快速冻结处理贻贝和更低的冻藏温度有利于保持贻贝的水分含量。

2.3 超低温冷冻和冻藏对贻贝质构特性的影响

质构是指食品的组织结构和口感性质,包括质地、硬度、弹性、咀嚼性等方面。在贻贝的冻藏过程中,质构特性能够反映出贻贝的新鲜程度和品质。如果冻藏过程中贻贝的质构特性发生明显的改变,例如硬度增加、弹性降低等,可能意味着贻贝的结构被破坏或水分流失较大,对贻贝的品质和口感产生了不利影响^[21]。通过观察质构特性的变化,可以调整和改进贻贝的冻藏和解冻工艺,提高贻贝产品的保鲜效果和品质稳定性。

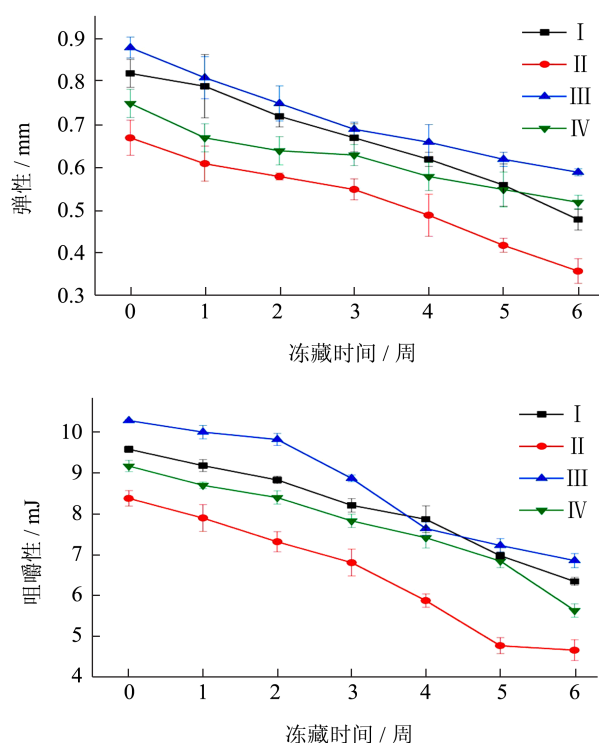


图3 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉弹性和咀嚼性的影响

Fig.3 Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on springness and chewiness of cooked mussel

本研究测定了冻藏贻贝在冻藏周期里肌肉弹性和咀嚼性的变化。由图3可知,各组贻贝的弹性和咀嚼性均随着冻藏时间的延长而降低,在冻藏第4

周后,各组贻贝弹性和咀嚼性显著下降 ($P < 0.05$);直至冻藏第5周,贻贝弹性均表现为III组 (0.62 mm) > I组 (0.56 mm) > IV组 (0.55 mm) > II组 (0.42 mm);冻藏第6周时,第I组贻贝弹性下降至0.48 mm,低于第IV组贻贝 (0.52 mm)。冻藏过程中,贻贝肉组织间不断产生冰晶,冰晶体积不断变大。冻藏后期,由于冰晶体积增大,对贻贝肉细胞结构和肌纤维组织造成机械损伤更大,导致其水分流失和蛋白质变性,贻贝的质地变得更加干枯、脆弱和松散,其弹性和咀嚼性显著下降。液氮处理迅速将贻贝肉冷冻至极低的温度,可有效减少冻结过程中的冰晶形成和细胞损伤,有助于保持贻贝的原始质地和口感。贻贝在慢速冷冻过程中,冻结速度较慢,冰晶形成相对较大且不均匀,可能导致更多的机械损伤,使贻贝的弹性和咀嚼性下降。第I组和第III组,第II组和第IV组之间进行对比,发现经液氮处理过的贻贝弹性和咀嚼性更高;Teng等^[22]研究发现经液氮处理贻贝肉后冻藏可以有效保持其肌肉质构特性。

由图3可知,第I组和第II组,第III组和第IV组之间进行对比,发现冻藏温度越高,贻贝的弹性和咀嚼性越好。Lopata等^[23]研究发现,较低的冻藏温度会导致贻贝蛋白质分子间形成非共价键,改变蛋白质空间结构,水分与蛋白质的结合力下降,导致产生更多的水分流失。在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境里,贻贝可能更容易失去水分,尤其是在冻藏期间和解冻过程中。水分流失会导致贻贝组织的干燥和收缩,进一步影响其弹性和咀嚼性。因此,在同一冻藏时间下,贮藏在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱的贻贝的弹性和咀嚼性可能会比贮藏在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱的冻藏贻贝更高。

2.4 超低温冷冻和冻藏对贻贝感官评分的影响

感官评价指标包括质地、滋气味、外观及色泽,感官评价结果见表3。从总体来看,第III、IV组的感官评分总分均高于第I、II组;随着冻藏时间的推移,冻藏贻贝的感官评分均下降,在各自条件下,第III、IV组贻贝依然保持良好色泽,无干耗,而第I、II组贻贝几乎全部发黄,出现明显的干耗现象。在质地表现上,冻藏期间,贻贝的质地评分变化趋势与贻贝质构特性变化趋势保持基本一致,自冻藏第4周起显著下降 ($P < 0.05$),在冻藏第5周前,第I、III组相对第II、IV组口感质地较硬,在冻藏的第5、6周,第IV组的质地表现要高于第I组。这可能是因为在整个冻藏过程中,由于更低的冻藏温

度会导致贻贝肉内部水分流失较多, 肉质变得松散软塌, 冻藏温度较高的组别在口感、弹性方面优于冻藏温度较低的组别。而在冻藏后期, 起初因为经液氮速冻时贻贝肌肉细胞受到的机械损伤较小, 保留了部分结合水, 从而减少了肉质质地的下降幅度。在滋气味指标上, 第 I、II 组出现了较明显的腥臭味, 这可能是随着冻藏时间的延长, 腐败菌不断繁殖, 贻贝的腐败变质现象逐渐变得更为严重。冻藏

第 6 周时, 各组贻贝在质地、滋气味、外观及色泽方面的感官评分均显著下降, 贻贝呈干瘪、僵硬状态, 散发腥臭味, 其中第 I 组腥臭味最大, 滋味最差, 色泽暗黄有干耗, 其余三组也出现不同程度的劣变。

在整个冻藏期间, 第 IV 组感官评分总分最高。由此可得出, 经液氮超低温处理并贮藏于更低温度的贻贝肉虽然肉质质地不够紧密, 但总体感官品质评价最好。

表 3 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝感官评分的影响

Table 3 The effect of ultra-low temperature freezing and frozen storage on the sensory evaluation of cooked mussel

周数	组别	质地	滋气味	外观及色泽	总分
0	I	18.17 ± 1.07 ^b	9.00 ± 0.58 ^d	12.67 ± 0.75 ^c	39.83 ± 1.34 ^a
	II	15.83 ± 0.69 ^b	12.83 ± 1.67 ^c	13.00 ± 1.15 ^c	41.67 ± 2.62 ^a
	III	18.83 ± 1.67 ^b	13.67 ± 1.25 ^c	13.17 ± 1.07 ^c	45.67 ± 1.97 ^a
	IV	16.17 ± 1.07 ^b	15.00 ± 0.58 ^b	12.67 ± 0.75 ^a	43.83 ± 1.21 ^a
1	I	17.00 ± 0.82 ^b	8.67 ± 0.94 ^d	12.67 ± 1.25 ^c	38.17 ± 2.11 ^a
	II	13.67 ± 0.94 ^b	13.00 ± 1.29 ^b	12.67 ± 1.25 ^b	39.30 ± 2.36 ^a
	III	18.33 ± 0.94 ^b	13.50 ± 1.38 ^c	12.67 ± 1.25 ^c	44.5 ± 3.35 ^a
	IV	16.17 ± 1.07 ^b	14.17 ± 0.69 ^a	12.83 ± 1.21 ^a	43.67 ± 2.43 ^a
2	I	14.00 ± 0.81 ^b	7.83 ± 0.69 ^c	9.00 ± 0.82 ^c	30.50 ± 1.26 ^a
	II	11.5 ± 0.96 ^b	10.83 ± 0.69 ^b	10.17 ± 0.69 ^b	32.50 ± 1.80 ^a
	III	17.83 ± 0.69 ^b	12.67 ± 0.94 ^c	12.17 ± 0.69 ^c	42.67 ± 1.89 ^a
	IV	13.00 ± 1.15 ^b	11.83 ± 1.21 ^b	12.17 ± 0.69 ^b	37.67 ± 2.87 ^a
3	I	15.17 ± 0.69 ^b	7.83 ± 1.34 ^c	6.83 ± 1.21 ^c	29.30 ± 3.25 ^a
	II	11.33 ± 1.11 ^b	10.67 ± 0.75 ^b	7.83 ± 0.69 ^c	29.83 ± 1.21 ^a
	III	17.33 ± 0.75 ^b	10.50 ± 0.96 ^c	9.83 ± 0.69 ^c	37.67 ± 1.25 ^a
	IV	12.67 ± 0.75 ^b	11.50 ± 1.26 ^b	11.83 ± 0.69 ^b	36.33 ± 2.05 ^a
4	I	15.00 ± 0.58 ^b	7.00 ± 0.82 ^c	4.67 ± 0.75 ^d	26.00 ± 2.45 ^c
	II	10.33 ± 1.11 ^b	8.83 ± 0.69 ^c	6.83 ± 0.69 ^d	26.00 ± 1.63 ^a
	III	15.50 ± 0.96 ^b	8.67 ± 0.75 ^c	8.17 ± 0.69 ^c	32.33 ± 1.11 ^a
	IV	12.00 ± 0.58 ^b	9.83 ± 0.69 ^c	11.17 ± 0.69 ^b	32.67 ± 0.94 ^a
5	I	9.67 ± 0.75 ^b	4.83 ± 0.90 ^c	4.67 ± 0.94 ^c	18.83 ± 1.57 ^a
	II	7.67 ± 0.75 ^b	8.00 ± 0.82 ^b	6.17 ± 0.69 ^c	21.83 ± 1.07 ^a
	III	12.33 ± 1.11 ^b	8.17 ± 0.69 ^c	4.83 ± 0.69 ^d	25.33 ± 1.37 ^a
	IV	9.83 ± 0.69 ^b	7.83 ± 0.69 ^c	10.83 ± 0.69 ^b	28.50 ± 1.89 ^a
6	I	8.50 ± 0.50 ^b	2.17 ± 0.69 ^d	3.83 ± 0.69 ^c	14.50 ± 1.50 ^a
	II	7.17 ± 1.07 ^b	7.00 ± 0.58 ^b	5.67 ± 0.75 ^b	19.83 ± 1.46 ^a
	III	10.67 ± 0.75 ^b	7.67 ± 0.75 ^c	4.67 ± 0.75 ^d	23.00 ± 2.24 ^a
	IV	8.83 ± 0.69 ^c	7.67 ± 0.75 ^c	10.67 ± 0.75 ^b	27.17 ± 1.34 ^a

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$); I: 常规冻结 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏, II: 常规冻结 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏, III: 液氮冻结 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏, IV: 液氮冻结 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏。

2.5 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉中TVB-N含量的影响

挥发性盐基氮是指蛋白质分解产生的挥发性化合物，主要包括胺类物质。挥发性盐基氮的水平与贻贝的鲜度密切相关。通过检测挥发性盐基氮的含量，可以评估贻贝的鲜度。一些挥发性盐基氮化合物可能与贝类中的致病菌或寄生虫相关^[24]，监测挥发性盐基氮的含量可以帮助检测贻贝中是否存在食品安全隐患。

本研究对冻藏贻贝在各个周期时挥发性盐基氮含量进行检测，其含量变化见图4。冻藏期间，第I组、第III组TVB-N值均显著($P < 0.05$)上升，与第0周相比，冻藏第6周时第I组TVB-N值增加量最多，共增加26.10 mg/100 g；第IV组TVB-N值增加量最少，共增加0.40 mg/100 g。这是因为液氮处理迅速降低了贻贝的温度，从而抑制细菌和酶的活性，延缓贻贝的腐败和变质过程^[25]。在液氮处理后，贻贝中的蛋白质分解反应会减缓，从而导致挥发性盐基氮的产生量减少。相反，未经液氮处理的贻贝在冰箱中冷藏，由于温度下降较慢，蛋白质分解反应仍然会持续进行，导致挥发性盐基氮的产生量较多。由于贮藏温度更低，贮藏于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中的贻贝蛋白质分解反应较贮藏于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中的贻贝更慢，所以挥发性盐基氮含量的产生量也较少。因此，通过液氮处理和低温冻藏，可以更好地保持贻贝的质量和新鲜度，从而减少腐败过程中挥发性盐基氮的生成。

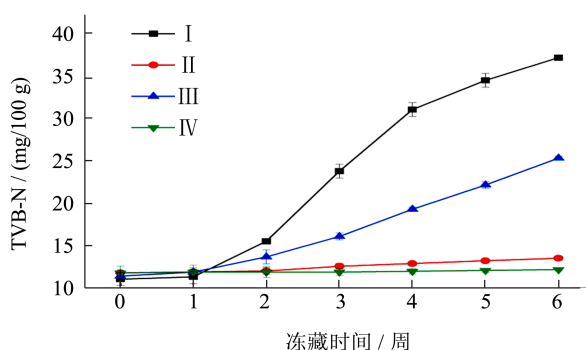


图4 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉 TVB-N 的影响

Fig.4 The effect of ultra-low temperature freezing and frozen storage on the TVB-N content of cooked mussel

2.6 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉菌落总数的影响

菌落总数是评估食品卫生安全的重要指标。高菌落总数可能意味着存在较多的微生物污染，包括

致病菌，因此可以帮助判断食品是否符合食品安全标准。菌落总数的变化可以反映冻藏贻贝的新鲜度和品质保持情况。通过比较不同冷冻和冻藏条件下的菌落总数，可以评估不同冷冻和冻藏工艺对贻贝保鲜效果的影响，并为工艺改进和质量控制提供依据。

超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉菌落总数的影响如图5所示。在冻藏过程中，各组贻贝的菌落总数均不断上升。冻藏第0周时，第I、II、III、IV组菌落总数分别为102、64、1、0 CFU/g。在冻藏过程中，由于冰箱的低温环境抑制了微生物的生长繁殖，微生物数量增长趋于平缓。在冻藏至第4周时，第I组菌落总数增长幅度变大，到第五周时增加了27 CFU/g。在冻藏至第6周时，第I、II、III、IV组菌落总数分别为204、167、68、32 CFU/g，其中第I组菌落总数增长最多，为120 CFU/g，第IV组菌落总数增长最少，为32 CFU/g。张登科等^[26]采用液氮处理大黄鱼并进行低温贮藏，与空白组相比，经液氮处理后的样品菌落总数明显更低，说明液氮冷冻具有良好抑菌作用。这是因为在液氮处理时，贻贝肉中的水分在极低的温度下快速形成大量细微冰晶，微生物内部结构受到破坏而迅速凋亡，菌落总数锐减。在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏，微生物的代谢、生长和繁殖的速度均会减慢^[27]。因此，经过液氮处理后的贻贝冻藏于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中往往具有较低的菌落总数。液氮处理有助于保持贻贝的新鲜度和质量，并延长其货架寿命。更低的温度环境可以有效地减弱微生物的生长和繁殖速率，从而显著降低冻藏贻贝中的菌落总数。

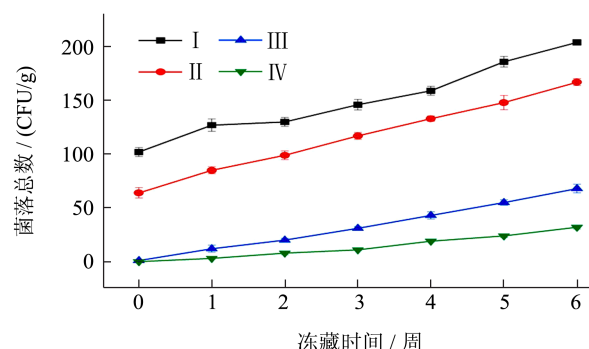


图5 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉菌落总数的影响

Fig.5 The effect of ultra-low temperature freezing and frozen storage on the total bacterial count of cooked mussel

2.7 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉肌原纤维蛋白Ca²⁺-ATPase活性的影响

肌原纤维蛋白是一种与钙离子(Ca²⁺)转运相

关的蛋白质,在肌细胞中起着重要的调节钙离子平衡的作用^[28]。该酶活性的测定可以反映冻藏贻贝组织中的新鲜度和细胞功能状态。如果贻贝的 Ca^{2+} -ATPase活性较高,说明贻贝组织中的细胞膜完整性和新鲜度较好,冻藏贻贝品质较高。

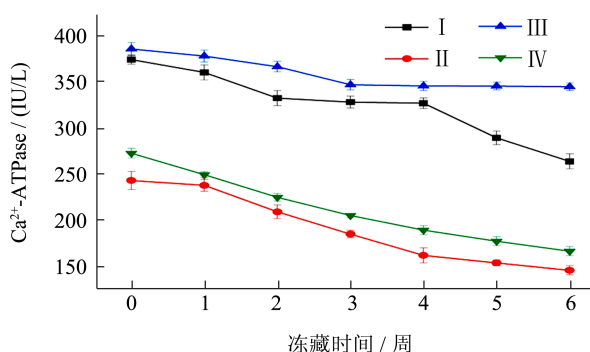


图6 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性的影响

Fig.6 Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on Ca^{2+} -ATPase activity of myofibrillar protein in cooked mussel

超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性的影响如图6所示,第I组在冻藏第2周至第4周 Ca^{2+} -ATPase活性变化不显著($P>0.05$),由332.94 IU/L下降至327.32 IU/L。在冻藏第4周后第I组 Ca^{2+} -ATPase活性显著($P<0.05$)下降。在冻藏第6周时,第I、II、III、IV组贻贝肉肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性分别为264.24、146.28、345.21、166.98 IU/L;各组贻贝肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性均随冻藏时间的延长而下降;第I、III组贻贝的肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase活性在冻藏的各个时间段都要显著($P<0.05$)高于第II、IV组;经液氮快速冻结的第III组和第IV组冻藏贻贝 Ca^{2+} -ATPase活性分别高于第I组和第II组。这是因为更低的冻藏温度和冻藏过程中生成的冰晶都会对酶活性产生不利影响,包括 Ca^{2+} -ATPase活性。低温环境下冻藏会导致酶活性降低,长时间的冻藏会导致细胞膜的损伤,细胞内部的酶也可能遭受降解或失活,从而导致 Ca^{2+} -ATPase活性的下降。此外,冻藏过程中可能会发生冻融循环,即冰晶的形成和融化,这也可能导致细胞膜的破坏和酶的失活。这些因素共同作用,导致贻贝中的 Ca^{2+} -ATPase活性随着冻藏时间的增加而下降^[29];而液氮处理有助于减少冰晶形成,从而减少对细胞结构和酶活性的破坏。经液氮处理后的贻贝肉肌肉细胞结构得到较好

保护,形成的细小冰晶对贻贝肉肌原纤维蛋白的机械损伤小,能够维持较高的 Ca^{2+} -ATPase活性。张晋^[30]研究发现液氮速冻处理草鱼能有效延缓其在冻藏期间 Ca^{2+} -ATP酶活性下降。

2.8 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉pH值的影响

pH值是一种重要的贝类保鲜指标,可以反映贝类的新鲜度和品质。贻贝的pH值是指其组织中的酸碱度,通常在4~9之间。在贻贝的新鲜状态下,其pH值通常在7.0左右,这是由于贝类组织中的蛋白质和酶等成分保持相对稳定的状态。但是,随着冻藏时间的延长,其pH值会发生变化,通常会向酸性方向偏移,这是由于贝类组织老化和腐败,其中的酵素和微生物代谢产物等因素作用所产生的变化。

由图7可知,各组贻贝在冻藏期间pH值均下降。刘欣荣^[31]发现红鳍东方鲀在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏,pH值随冻藏时间延长呈先上升后降低的趋势,这是因为原料不同,肌肉细胞结构和酶不同,pH值变化趋势存在差异。在冻藏第4周时,第I、II、III、IV组贻贝pH值分别下降至6.45、6.90、6.62、7.36,之后下降趋势不显著($P>0.05$)。整个冻藏期间,经液氮处理冻结的贻贝pH值均高于常规冻结的贻贝;在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冻藏的贻贝pH值均略高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冻藏的贻贝。在液氮处理时,快速冷冻有效抑制了微生物的生长和代谢活动^[32]。相比之下,常规冻结可能无法达到同样的抑制效果。微生物的生长和代谢通常会产生酸性代谢产物,因此,经液氮处理冻结的贻贝受到微生物产生的酸性影响相对较少,从而导致pH值较高。此外,相对冻藏温度较高的 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻藏于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对微生物的生长和代谢抑制效果更明显,产生的酸性代谢产物较少,导致pH值略高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冻藏的贻贝。

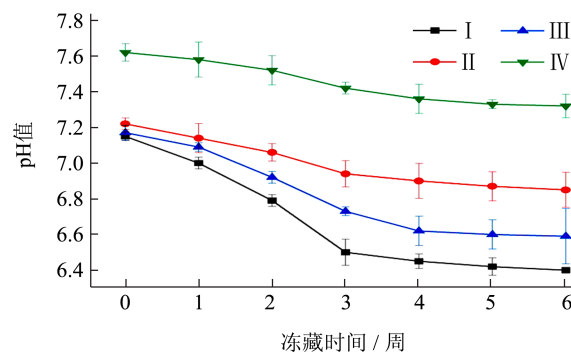


图7 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉pH的影响

Fig.7 Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on pH of cooked mussel

2.9 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉色差的影响

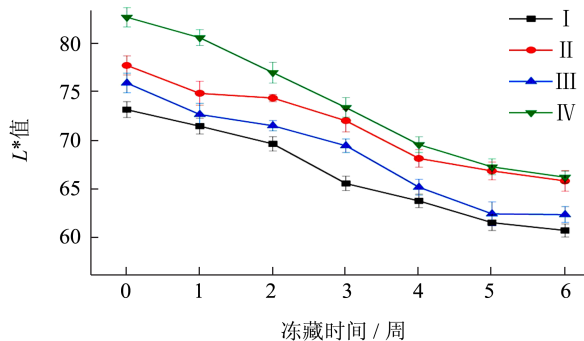


图8 超低温冷冻和冻藏对熟贻贝肉 L* 的影响

Fig.8 Effects of ultra-low temperature freezing and frozen storage on L* of cooked mussel

在色差的测定中, L^* 值表示亮度, 其值越大, 代表颜色越亮。本实验采用 L^* 值来评价解冻后的贻贝色泽。由图 8 可见, 各组贻贝在冻藏初期 L^* 值均较大, 色泽较亮。随着时间的延长, 在冻藏前 5 周, 不同冻藏温度的贻贝 L^* 值变化有着显著差异 ($P < 0.05$)。冻藏第 6 周时, 第 I、II、III、IV 组的 L^* 值分别为 60.69、65.79、62.33、66.18, 第 IV 组的最高, 其次是第 II 组, 均比第 I 组高, 这表明液氮处理贻贝以及更低温度的贮藏环境对冻藏贻贝的色泽有着良好的保持效果。当贻贝在冻藏过程中温度下降缓慢时, 酶和微生物的活性仍然持续进行。这意味着酶会继续催化贻贝中的蛋白质分解, 导致贻贝的颜色变化速度加快。同时, 微生物也会在适宜的温度下繁殖并分解贻贝中的营养物质, 产生一系列代谢产物, 这些代谢产物也可以影响贻贝的颜色^[33]。而液氮处理可以迅速将贻贝的温度降低到极低的水平, 抑制酶和微生物的活性。在低温下, 酶的催化作用几乎停止, 微生物的繁殖速度显著减慢。这样可以避免或延缓贻贝中酶和微生物的活性, 减少蛋白质分解和颜色变化的速度。

3 结论

本文以厚壳贻贝为研究对象, 探究液氮快速冷冻和不同冻藏温度对熟贻贝肉冻藏期间品质的影响。实验得出, 液氮超低温冻结处理熟贻贝肉以及更低的贮藏温度均可以有效降低其在冻藏期间的解冻损失率, 保留了更多的水分, 抑制了感官品质的劣变, 保持着良好的弹性和咀嚼性。在冻藏期间, 液氮前处理和低温贮藏减缓了熟贻贝肉 TVB-N 含量和菌落总数上升的趋势, 延缓了 pH 的下降, 同

时较好的保持贻贝的色泽。实验还发现, 更低的冻藏温度会影响贻贝的质构特性, 并抑制贻贝肌原纤维蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性。液氮处理贻贝可以作为贻贝新型加工技术来开发与应用, 在一定程度上推动解决贻贝冷冻后品质下降的问题, 为改进水产品的加工工艺提供参考。

参考文献

- [1] 程海,袁跃峰,李德然.贻贝养殖及加工综述[J].农村经济与科技,2019,30(17):81-85.
- [2] 陶美洁.贻贝蒸煮液浓缩及风味改良研究[D].杭州:浙江工商大学,2020.
- [3] 张安琪.嵊泗县贻贝产业发展研究[D].舟山:浙江海洋大学,2022.
- [4] 程骏,叶卫富,罗海忠,等.浙江省嵊泗县贻贝产业发展现状及SWOT分析[J].中国渔业经济,2022,40(5):57-66.
- [5] BEJAOU S, GHRIBI F, CHETOU I, et al. Effect of storage temperature and time on the fatty acids and nutritional quality of the commercial mussel (*Mytilus galloprovincialis*) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(9): 3493-3503.
- [6] 虞铭霞,张怡,张宾.海藻糖和褐藻胶寡糖对冻藏紫贻贝品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(9):163-169,95.
- [7] 吴越,易冲,沈俊,等.低压变频电场对蒸煮贻贝冰温保鲜效果的影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(10): 3075-3082.
- [8] 吕丹丹.紫贻贝体内金属含量分析及品质保障技术研究[D].舟山:浙江海洋大学,2020.
- [9] DE SANTIS L, PARMEGIANI L, SCARICA C, et al. Changing perspectives on liquid nitrogen use and storage [J]. Journal of Assisted Reproduction and Genetics, 2021, 38(4): 783-784.
- [10] ROUSSEV M, LEHOTAY S J, POLLAEHNE J. Cryogenic sample processing with liquid nitrogen for effective and efficient monitoring of pesticide residues in foods and feeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(33): 9203-9209.
- [11] EADES B. Freezing and recovering rare red blood cells using liquid nitrogen [J]. Immunohematology, 2021, 37(4): 157-159.
- [12] 刁玉段.直接浸渍冻结对冻藏草鱼保鲜效果的影响和机制研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [13] SHAFIEIPOUR A, SAMI M. The effect of different thawing methods on chemical properties of frozen pink shrimp (*Penaeus duorarum*) [J]. Iranian Journal of Veterinary Medicine, 2015, 9(1): 1-6.
- [14] CAI L, WAN J, LI X, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and structure of

- largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(3): 582-591.
- [15] 朱琳.冻藏过程中虾夷扇贝闭壳肌感官品质及其组织特性的变化规律[D].上海:上海海洋大学,2023.
- [16] 崔瑞颖,焦学芹,崔波,等.冻藏对海湾扇贝闭壳肌蛋白质变性及组织结构的影响[J].食品工业科技,2013,34(22): 298-301.
- [17] DIAO Y, CHENG X, WANG L, et al. Effects of immersion freezing methods on water holding capacity, ice crystals and water migration in grass carp during frozen storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131(3): 581-591.
- [18] 马新悦,韩悦,邓尚贵,等.不同冻藏温度对小黄鱼贮藏期间品质变化的影响[J].现代食品科技,2023,39(4):118-125.
- [19] PEGG D E. The relevance of ice crystal formation for the cryopreservation of tissues and organs [J]. Cryobiology, 2010, 60(3-supp-S): S36-S44.
- [20] CAO X H, ZHANG F F, ZHAO D Y, et al. Effects of freezing conditions on quality changes in blueberries [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(12): 4673-4679.
- [21] ZHANG B, WU H X, YANG H CH, et al. Cryoprotective roles of trehalose and alginate oligosaccharides during frozen storage of peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food Chemistry, 2017, 228: 257-264.
- [22] TENG X, LIU Y, CHEN L, et al. Effects of liquid nitrogen freezing at different temperatures on the quality and flavor of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Food Chemistry, 2023, 422: 136162.1-136162.8.
- [23] LOPATA A L, O'HEHIR R E, LEHRER S B. Shellfish allergy [J]. Clin Exp Allergy, 2010, 40(6): 850-858.
- [24] TAMOLIUNAS K, GALAMBAS N. Protein denaturation, zero entropy temperature, and the structure of water around hydrophobic and amphiphilic solutes [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2020, 124(48): 10994-11006.
- [25] 朱士臣,曾曦,龙官誉,等.茶多酚-姜黄素复配液对冻藏贻贝肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(15):198-205.
- [26] 张登科,陈姣,吴林洁,等.液氮冷冻处理对养殖大黄鱼保鲜品质及菌群结构的影响[J].食品工业科技,2018, 39(14):252-257,263.
- [27] ONYANGO L A, HUGH D R, JOHAN G, et al. Effect of low temperature on growth and Ultra-Structure of *staphylococcus* spp [J]. Public Library of Science, 2012, 7(1): 1-10.
- [28] 邱凯.胞内钙离子平衡与骨骼肌前体细胞成肌成脂分化的关系研究[D].北京:中国农业大学,2018.
- [29] REZA M S, BAPARY M A J, AHASAN C T, et al. Shelf life of several marine fish species of Bangladesh during ice storage [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 44(8): 1485-1494.
- [30] 张晋.草鱼低温保藏品质变化及绿色加工技术研究[D].上海:上海海洋大学,2022.
- [31] 刘欣荣.不同贮藏方式对红鳍东方鲀品质的影响研究[D].保定:河北农业大学,2021.
- [32] LEE H H, JUNG W Y, LEE W K, et al. Initial freshness of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) affects its quality and self-life during freezing storage [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2017, 5(9): 629-635.
- [33] 刘丽娟,孟香丽,姜向阳,等.不同保存条件对贝类体内微生物的影响[J].食品科学,2010,31(1):84-86.