

# 不同冻结方式对海鲈鱼品质特性的影响

赵茜<sup>1,2,3</sup>, 盖雨欣<sup>1</sup>, 孙海涛<sup>1,2,\*</sup>, 单雨时<sup>1</sup>, 梁菊芳<sup>1</sup>, 陆爱梅<sup>1</sup>, 李浩添<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>, 邵信儒<sup>2</sup>, 于潇淳<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>1,2</sup>  
(1.通化师范学院食品科学与工程学院, 吉林 通化 134000; 2.通化师范学院 长白山食用植物资源开发工程中心, 吉林 通化 134000; 3.浙江工商大学食品与生物工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 采用空气冻结、超低温冻结、复配载冷剂冻结(含20%乙醇(体积分数,下同)、20%丙二醇、5 g/100 mL海藻糖的水溶液)和乙醇冻结处理海鲈鱼,考察不同冷冻方式对海鲈鱼品质的影响。结果表明:复配载冷剂冻结、乙醇冻结组冻结速率分别为8.20 cm/h和6.25 cm/h,分别是空气冻结速率的32.80倍和25.00倍。观察鱼肉的微观结构可知,经液体冷冻后肌肉组织间形成的冰晶较小,肌纤维间排列紧密。复配载冷剂冻结更有利于保持鱼肉的持水力,能减缓不易流动水的迁移,对保持鱼片的新鲜度、质构特性及蛋白热稳定性具有显著作用。研究结果表明以含20%乙醇、20%丙二醇、5 g/100 mL海藻糖的水溶液作为复配载冷剂的冻结方式可有效减缓海鲈鱼冷冻品质的劣化,本研究可为提升冷冻水产品的冻藏品质提供理论和实践依据。

**关键词:** 海鲈鱼; 冻结方式; 复配载冷剂; 品质

## Effects of Different Freezing Methods on the Quality of Sea Bass

ZHAO Xi<sup>1,2,3</sup>, GAI Yuxin<sup>1</sup>, SUN Haitao<sup>1,2,\*</sup>, SHAN Yushi<sup>1</sup>, LIANG Jufang<sup>1</sup>, LU Aimei<sup>1</sup>, LI Haotian<sup>1</sup>,  
LI Ming<sup>1</sup>, SHAO Xinru<sup>2</sup>, YU Xiaochun<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Tonghua Normal University, Tonghua 134000, China; 2. Changbai Mountain Edible Plant Resources Development Engineering Center, Tonghua Normal University, Tonghua 134000, China;  
3. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In this study, the effects of different freezing methods namely air freezing, cryogenic freezing, freezing after dipping in a refrigerating medium consisting of 20% ethanol (V/V), 20% propylene glycol (V/V), 5 g/100 mL trehalose aqueous solution and freezing after dipping in anhydrous ethanol on the quality of sea bass were investigated. The results showed that the freezing rates of refrigerating medium freezing and anhydrous ethanol freezing were 8.20 and 6.25 cm/h, which were 32.80 and 25.00 times as high as that of air freezing, respectively. The microstructure of frozen sea bass showed that the small ice crystals formed between muscle tissues were small, and the muscle fibers were closely arranged. Refrigerating medium freezing was more conducive to maintaining the water-holding capacity (WHC) of muscle tissues and slowing down the migration of immobilized water, and had a significant effect on maintaining the freshness, texture properties and protein thermostability of fish fillets. In summary, refrigerating medium freezing can effectively slow down the quality deterioration of frozen sea bass. The results of this study will provide a theoretical and practical basis for improving the storage quality of frozen aquatic products.

**Keywords:** sea bass; freezing method; refrigerating medium; quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220922-232

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)15-0220-07

引文格式:

赵茜, 盖雨欣, 孙海涛, 等. 不同冻结方式对海鲈鱼品质特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 220-226. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220922-232. <http://www.spkx.net.cn>

ZHAO Xi, GAI Yuxin, SUN Haitao, et al. Effects of different freezing methods on the quality of sea bass[J]. Food Science, 2023, 44(15): 220-226. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220922-232. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(YDZJ202101ZYTS091); 通化师范学院学生创新训练项目(CS2021114)

第一作者简介: 赵茜(1994—)(ORCID: 0000-0003-2002-2752), 女, 博士研究生, 研究方向为食品质量与安全。

E-mail: zhaoxi2347@163.com

\*通信作者简介: 孙海涛(1981—)(ORCID: 0000-0002-5978-7720), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工、保鲜及功能性包装技术。E-mail: sunhaitao@126.com

我国是水产品生产大国,2021年我国水产品总产量达到6 690.29万 t,已连续多年居世界首位<sup>[1]</sup>。然而由于水产品的高蛋白、高水分含量及中性pH值等特点,捕获后极易在微生物及内源酶的用下发生腐败,造成资源浪费及经济损失<sup>[2]</sup>。作为传统、有效的保鲜方式,冷冻保鲜在各类水产品中得到广泛应用。其中低温液态速冻因冻结速率快、冻品质量高及能耗低的特点,近年来得到广泛关注。液体冷冻的传热传质过程显著缩短了冷冻时间,其冷冻产品形成的冰晶细小均匀,更利于保持产品品质<sup>[3-4]</sup>。低温液态速冻能够实现单体速冻、载冷剂可循环利用、设备投资低等特点使其在水产品冷冻加工中凸显了较大优势,并且从产业化角度而言,可显著提高经济效益,具有广阔的应用前景。

载冷剂是低温液态速冻技术的核心,近年来有研究关注于乙醇、丙二醇、丙三醇、氯化钠等作为浸渍载冷剂组分对产品品质的影响<sup>[5-6]</sup>。然而直接浸渍冷冻容易因溶质渗透导致产品质量下降,限制了液体冷冻的推广应用。此外,有研究指出,冷冻和冷冻贮藏过程冰晶、蛋白质和脂质的变化会影响鱼类的质量和营养价值,而使用新型载冷剂的液体冷冻可以控制冰晶成核,调控蛋白质、脂肪的氧化及变性进程,对冻品的质量产生积极影响<sup>[7-9]</sup>。

基于此,本研究以乙醇、丙二醇、海藻糖配制低温液态速冻载冷剂,结合空气冻结、超低温冻结、乙醇冻结等处理预包装的海鲈鱼,比较不同冷冻方式对海鲈鱼肌肉组织持水力、水分迁移、微观结构、新鲜度及蛋白质热稳定性的影响,旨在确定海鲈鱼的适宜冷冻方式,为水产品低温液态速冻及冻品质量保持提供依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

鲜活海鲈鱼购自通化市水产批发市场,鱼体健康均匀,体质量(0.75±0.05) kg。

乙醇、1,2-丙二醇(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;海藻糖 河南万邦化工科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

Kjeltec 8400全自动凯氏定氮仪 丹麦Foss公司;AL104型电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;CT3型质构仪 美国博勒飞公司;Q2000差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC) 美国TA仪器有限公司;PQ001低场核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品预处理

将海鲈鱼去头、尾、鱼鳞及内脏,沿脊骨将背部鱼肉剖片,切分成约3.0 cm×3.0 cm×1.0 cm的鱼块并进行

真空包装,随后置于4℃冰箱冷藏备用。整个处理过程在低温环境下进行,30 min内完成。

#### 1.3.2 样品冻结

将处理好的鱼肉样品随机分成4组:空气冻结:样品置于(-18±2)℃的冰箱中冻结;超低温冻结:放入-80℃超低温冰箱中冻结;复配载冷剂冻结:采用蒸馏水配制含体积分数20%乙醇、体积分数20%丙二醇、5 g/100 mL海藻糖的混合溶液,于-30℃下浸渍冻结;乙醇冻结:无水乙醇,于-30℃下浸渍冻结。

待各组鱼肉样品中心温度达到-18℃时取出,并迅速转移样品于-18℃冻藏。实验开始前将样品置于4℃冰箱解冻12 h后进行理化指标测定。

#### 1.3.3 冻结曲线及冷冻速率的测定

将温度记录仪测温探头垂直插入鱼肉中心,每10 s记录一次,当鱼片中心温度达到-18℃时将探头取出。以冷冻时间为横坐标,鱼肉中心温度为纵坐标,绘制冻结曲线。根据式(1)<sup>[10]</sup>计算冷冻速率。

$$\text{冷冻速率}/(\text{cm}/\text{h}) = L/t \quad (1)$$

式中: $L$ 为鱼肉表面与热中心的最短距离/cm; $t$ 为鱼肉表面从0℃开始至中心温度达到初始冻结点(-2.2℃)以下10℃所需时间/h。

#### 1.3.4 持水性的测定

##### 1.3.4.1 解冻损失率

用滤纸轻轻吸去已解冻的鱼块表面水分后称质量,按式(2)计算解冻损失率。

$$\text{解冻损失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

式中: $m_1$ 为冻结前质量/g; $m_2$ 为解冻后质量/g。

##### 1.3.4.2 蒸煮损失率

取(5.0±0.5) g解冻后样品放入烧杯中,在80℃水浴中加热30 min后取出,冷却至室温后,称鱼肉质量,按式(3)计算蒸煮损失率。

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (3)$$

式中: $m_3$ 为蒸煮前质量/g; $m_4$ 为蒸煮后质量/g。

##### 1.3.4.3 离心损失率

取2 g肉样,用滤纸包裹后,在4℃、3 000 r/min条件下离心20 min,按式(4)计算离心损失率。

$$\text{离心损失率}/\% = \frac{m_5 - m_6}{m_5} \times 100 \quad (4)$$

式中: $m_5$ 为离心前质量/g; $m_6$ 为离心后质量/g。

#### 1.3.5 低场核磁共振测定

将鱼肉切割为1 cm×1 cm×2 cm,采用低场核磁共振仪,将鱼肉样品置于核磁管中,采用CPMG序列测定。设定质子共振频率22 MHz,测定温度32℃,采样频率

100 kHz, 重复等待时间2 000 ms, 重复扫描8次, 所得指数衰减曲线以仪器自有软件反演得到 $T_2$ 图谱。

### 1.3.6 质构特性的测定

取2 cm×2 cm×1 cm鱼背部肌肉, 用滤纸吸去表面水分后, 用质构仪的TPA模式测定不同冷冻方式鱼肉的硬度、弹性、内聚性、胶着性和咀嚼性。测试速率1 mm/s、压缩百分比30%。

### 1.3.7 微观结构观察

将冷冻鱼肉固定于冷冻切片样品托盘上, 切片厚度10 μm, 用苏木素-伊红试剂盒染色, 光学显微镜下观察样品纵切面并拍照记录。

### 1.3.8 海鲈鱼新鲜度表征

#### 1.3.8.1 pH值测定

参照GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品pH值的测定》, 称取10 g解冻好的鱼肉样品, 加入90 mL蒸馏水, 静置30 min, 测定溶液pH值。

#### 1.3.8.2 挥发性盐基氮含量的测定

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》, 称取10 g绞碎的肉样品, 加入1 g氧化镁粉末, 使用全自动凯氏定氮仪测定挥发性盐基氮 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) 含量。

#### 1.3.9 蛋白热稳定性测定

精确称取10 mg鱼肉样品放入坩埚, 置于DSC中, 起始温度20 °C, 以10 °C/min升温到90 °C。

### 1.4 数据处理与分析

鱼肉质构特性指标重复测定5次, 其余指标重复3次, 结果表示为平均值±标准差。采用SPSS Statistic 23.0软件, 以Duncan's检验对数据作统计分析 ( $P<0.05$ ), 采用Origin 2023软件绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻结方式对海鲈鱼冻结曲线及冷冻速率的影响

如图1所示, 空气冻结、超低温冻结、乙醇冻结组鱼肉的冻结曲线呈现先下降、逐渐平缓再下降3个阶段, 而复配载冷剂冻结处理的鱼肉冻结曲线呈现近乎直线下降的趋势。复配载冷剂冻结、乙醇冻结组冻结速率分别为8.20 cm/h和6.25 cm/h, 分别是空气冻结速率 (0.25 cm/h) 的32.80倍和25.00倍。这是由于液体冷冻的复配载冷剂及乙醇传热系数远高于冷空气的传热系数<sup>[11]</sup>。4组冻结方式中, 复配载冷剂的冷冻速率最快, 其原因是鲈鱼鱼片与乙醇、丙二醇、海藻糖组成的载冷剂之间的传热系数最大, 冷冻处理下鱼片中心温度迅速下降, 大幅提高了鲈鱼鱼片的冷冻速率。Qian Pan等<sup>[12]</sup>以气体冷冻和液体冷冻冻结鳙鱼, 也发现液体快速冷冻鱼肉通过最大冰晶形成区所需的时间更短, 冷冻速率明显快于气体冷冻。

-1~-5 °C为最大冰晶生成带, 是影响冷冻水产品质量的主要温度区间。由表1可知, 空气冻结、超低温冻结、复配载冷剂冻结、乙醇冻结跨越最大冰晶生成带的时间 (即相变时间) 分别为166.67、20.50、2.17 min和7.50 min, 可见复配载冷剂冻结组耗时最短。这进一步说明, 液体冷冻可通过直接接触的换热方式增强冷冻液和鱼片间的热交换速率, 并且相比乙醇冻结组, 乙醇、丙二醇、海藻糖水溶液的复配载冷剂对缩短跨越最大冰晶生成带时间、保持鱼肉品质更有效。

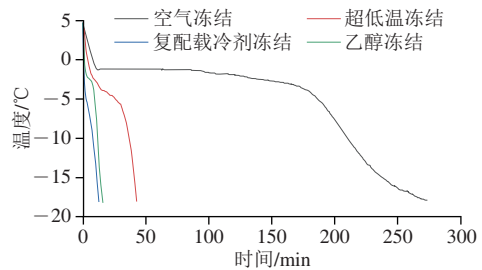


图1 冻结方式对海鲈鱼冻结曲线的影响

Fig. 1 Effect of freezing methods on the freezing curve of sea bass

表1 冻结方式对海鲈鱼冻结特性的影响

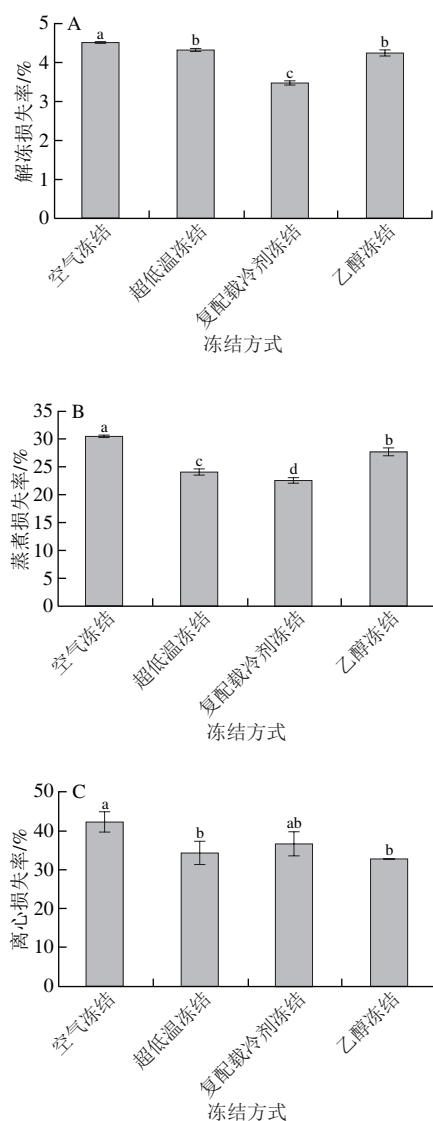
Table 1 Effect of freezing methods on the freezing characteristics of sea bass

冻结方式	冻结速率/ (cm/h)	预冷 时间/min	相变 时间/min	深冷 时间/min
空气冻结	0.25	9.50	166.67	71.17
超低温冻结	1.52	6.50	20.50	16.67
复配载冷剂冻结	8.20	1.33	2.17	10.17
乙醇冻结	6.25	2.33	7.50	13.83

### 2.2 冻结方式对海鲈鱼肌肉组织持水力的影响

如图2A所示, 经空气冻结、超低温冻结、复配载冷剂冻结、乙醇冻结的海鲈鱼解冻损失率分别为4.51%、4.31%、3.47%、4.26%, 其中复配载冷剂组样品的解冻损失率最低 ( $P<0.05$ )。复配载冷剂冻结速率快, 通过最大冰晶生成区的时间短, 生成的冰晶密度很小且分布均匀, 这减少了低温冷冻对肌肉组织结构的损伤, 并减少了解冻过程中汁液的渗出。对于与复配载冷剂体积相同的乙醇溶液, 同等状态下其强挥发性影响了载冷剂与鱼肉间的传热效率, 其跨过最大冰晶生成带的时间相对延长, 影响鱼肉组织结构, 形成的大冰晶更易导致肌纤维损伤, 进而导致解冻损失较高。冻结方式对鱼肉蒸煮损失率的影响如图2B所示, 其中, 空气冻结组海鲈鱼的蒸煮损失最高, 为30.44%, 显著高于乙醇冻结组的27.80%、超低温冻结组的23.89%和复配载冷剂冻结组的22.41% ( $P<0.05$ )。空气冻结组冷冻速率为0.25 cm/h, 属于慢速冷冻<sup>[13]</sup>, 缓慢跨越最大冰晶生成带导致了细胞间及细胞内产生大冰晶, 破坏了细胞的结构和完整性,

增加了水分的流动性,在加热作用下更易失水,从而降低了持水能力。由图2C可知,空气冻结组鱼肉的离心损失率最高,其原因很可能是冻结过程中鱼肉蛋白质的化学结构发生变化,引起肌肉组织持水力下降。另外,冻结过程中,冰晶的形成使细胞受到一定的机械损伤,导致肌纤维损伤,也会引起持水力下降。空气冻结与超低温冻结、复配载冷剂冻结、乙醇冻结相比冻结速率最慢,形成的冰晶大,细胞结构破坏程度大,导致持水性低于其他3组。Zhao Xi等<sup>[14]</sup>采用乙醇、丙二醇为主要组分的载冷剂对美国红鱼进行液体冷冻,并与空气冻结比较,结果表明,气体的传热系数低于低温冷冻液,空气冻结冷冻速率慢引起了肌肉组织持水力显著下降,这与本研究结果一致。



A.解冻损失率; B.蒸煮损失率; C.离心损失率。不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ); 下同。

图2 冻结方式对海鲈鱼肌肉组织持水力的影响

Fig. 2 Effect of freezing methods on the water-holding capacity of sea bass

### 2.3 冻结方式对海鲈鱼水分分布的影响

弛豫时间 $T_2$ 为0~1 ms和1~10 ms的水分代表与大分子物质紧密结合的结合水;  $T_2$ 为10~100 ms的水分是肌肉中水分的主要形式,为不易流动水;  $T_2$ 为100~1 000 ms的水分流动性最强,是肌纤维外的自由水<sup>[15-16]</sup>。如图3所示,不同冷冻组处理样品之间的结合水含量没有明显差异。与其他3组相比,在复配载冷剂组中,对应 $T_2$ 为10~100 ms的不易流动水峰面积所占比例最大,表明其不易流动水相对含量最高。这是由于复配载冷剂冷冻速率快(8.20 cm/h),通过最大冰晶生成带时间短(2.17 min),快速冷冻过程中形成了细小均匀的小冰晶,减小了冰晶形成和晶体生长对细胞的损伤,减缓了不易流动水向自由水的迁移。Wang Yueqi等<sup>[17]</sup>研究以乙醇、丙二醇、低聚果糖、氯化钙及柠檬酸组成的液体载冷剂对石斑鱼进行液体冷冻发现,液体冷冻有助于形成均匀分布的冰晶,减少肌肉组织的水分流失及微观结构损伤,这与本研究结果一致。Wu Zeyu等<sup>[18]</sup>研究也指出,液体冷冻及超声辅助液体冷冻能够显著降低不易流动水和自由水的损失。

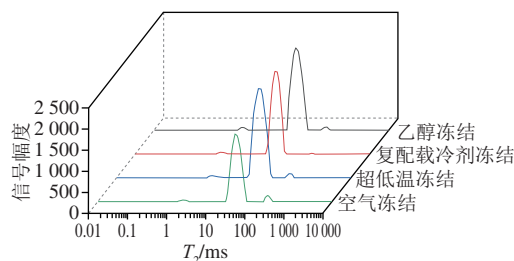


图3 冻结方式对海鲈鱼水分分布的影响

Fig. 3 Effect of freezing methods on water distribution in sea bass

### 2.4 冻结方式对海鲈鱼质构特性的影响

由表2可知,复配载冷剂冻结组的鱼肉硬度为(4 911.28±56.96) g,显著高于其他3组( $P < 0.05$ )。这是因为快速跨越最大冰晶生成带有效减小了冰晶对肌肉组织结构造成的损伤,此外,较高的冷冻速率也一定程度地抑制了蛋白酶和微生物的活性,因此复配载冷剂冻结组鱼肉硬度下降缓慢。超低温冻结与复配载冷剂有类似的保持肌肉组织弹性的特点,这与超低温的冻结温度有关,相比空气冻结组,超低温冻结能够以更大的温差加快鱼肉与冷空气的传热过程,因此鱼肉的弹性保持较好。空气冷冻鱼肉胶着性、咀嚼性显著低于其他3组( $P < 0.05$ ),乙醇冻结组和复配载冷剂组较高的冷冻速率有利于保持海鲈鱼的胶着性、咀嚼性。研究人员对美国红鱼<sup>[19]</sup>、鲈鱼<sup>[20]</sup>的冷冻研究同样发现了液体冷冻具有类似的保持鱼肉组织结构的优势。卞欢等<sup>[21]</sup>研究海藻糖溶液浸泡处理冻结鲫鱼发现,海藻糖溶液浸泡处理能显著提高鲫鱼的质构特性,这与本研究采用乙醇、丙二醇、海藻糖组成的复配载冷剂处理海鲈鱼的研究结果一致。

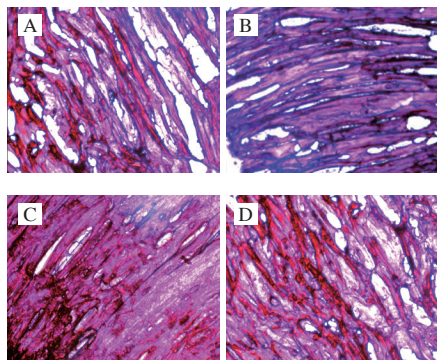
表2 冻结方式对海鲈鱼质构特性的影响  
Table 2 Effect of freezing methods on the texture of sea bass

质构特性	空气冻结	超低温冻结	复配载冷剂冻结	乙醇冻结
硬度/g	2 184.46±110.06 <sup>c</sup>	2 727.25±54.28 <sup>bc</sup>	4 911.28±56.96 <sup>d</sup>	3 357.42±125.36 <sup>b</sup>
内聚性	0.20±0.02 <sup>b</sup>	0.31±0.04 <sup>ab</sup>	0.42±0.12 <sup>a</sup>	0.25±0.05 <sup>ab</sup>
弹性	0.31±0.01 <sup>c</sup>	0.44±0.03 <sup>a</sup>	0.46±0.02 <sup>a</sup>	0.36±0.01 <sup>b</sup>
胶着性/g	645.29±44.06 <sup>c</sup>	820.08±32.45 <sup>bc</sup>	1 075.79±59.45 <sup>d</sup>	943.40±52.17 <sup>ab</sup>
咀嚼性/g	17.68±0.56 <sup>d</sup>	22.03±0.21 <sup>c</sup>	28.23±0.41 <sup>b</sup>	24.73±0.91 <sup>a</sup>

注：同行不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.5 不同冻结方式下海鲈鱼的微观结构

冷冻过程中产生的冰晶的大小和分布直接影响冷冻水产品的质量，其直观表现是鱼肉肌肉组织微观结构的完整性<sup>[22]</sup>。由图4可知，空气冻结组鱼肉肌纤维之间的间隙较大，部分肌纤维与肌节分离，这是由于慢速冷冻作用下形成了形状不规则的大冰晶，从而加速了肌肉组织的损伤。与其他3组相比，复配载冷剂组鱼肉的肌纤维之间排列更为整齐且紧密，这是由于快速冻结过程中，密集成核现象，形成了大量的细小冰晶，有利于保持肌肉组织结构。Liu Shulai等<sup>[23]</sup>研究浸泡冷冻对乌鳢冰晶形成和蛋白质特性的影响指出，低温的液体冷冻鱼肉中冰晶的分布更均匀、平均截面积更小，这与本研究结果一致。李新等<sup>[24]</sup>研究液氮及液氮处理对斑点叉尾鲷鱼肉的影响，也指出液体速冻更有利于保持鱼肉组织结构完整性。海鲈鱼的微观组织结构与肌肉组织持水力、水分分布及质构特性的结果一致。



A.空气冻结; B.超低温冻结; C.复配载冷剂冻结; D.乙醇冻结。

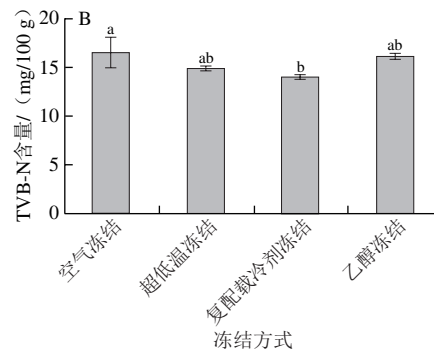
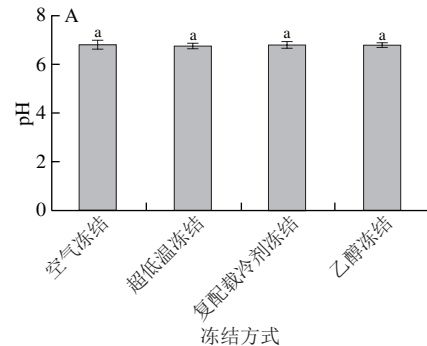
图4 冻结方式对海鲈鱼微观结构(纵截面)的影响(40×)

Fig. 4 Effect of freezing methods on the longitudinal cross-sectional microstructure of sea bass (40 ×)

### 2.6 冻结方式对海鲈鱼新鲜度的影响

由图5A可知，不同冷冻方式处理鱼肉pH值差异不显著，表明冷冻处理方式对鱼肉pH值影响较小。这可能是因为各组鱼肉冷冻及解冻处理过程中乳酸、磷酸的积累及三磷酸腺苷的降解程度接近<sup>[25]</sup>。Sun Qinxiu等<sup>[26]</sup>研究结果表明，经空气冻结、浸渍冷冻和超声辅助冷冻处理后，鲤鱼样品的pH值无显著差异 ( $P > 0.05$ )，与本研究结果一致。TVB-N含量反映了在微生物和内源酶作用下蛋白质

分解产生的挥发性氨和胺类化合物的程度，是评价水产品新鲜度的重要指标。如图5B所示，复配载冷剂组鱼肉的TVB-N含量为14.03 mg/100 g，显著低于空气冻结处理组，表明采用载冷剂液体冻结海鲈鱼对保持鱼肉新鲜度更具优势。这是因为复配载冷剂的快速冷冻过程抑制了鱼肉中的内源酶活力及微生物的生长，从而降低了鱼肉蛋白的降解，更有利于保持冷冻鱼肉的品。Ma Xuan等<sup>[27]</sup>研究多频超声辅助冷冻对大黄鱼冷冻速率、理化性质及微观结构的影响，发现液体冷冻后大黄鱼的TVB-N含量显著降低，可以提高冷冻大黄鱼的品质。石钢鹏等<sup>[28]</sup>研究液氮及冷冻液速冻对大口黑鲈鱼肉品质的影响也发现了类似的结果。总体而言，在不同冷冻处理方式下，液体冷冻相比空气冻结及超低温冻结表现出更好的保持鱼肉新鲜度的优势，复配载冷剂冻结相较乙醇冻结，对保持鱼肉的新鲜度更有效。



A. pH值; B. TVB-N含量。

图5 冻结方式对海鲈鱼新鲜度的影响

Fig. 5 Effect of freezing methods on the freshness of sea bass

### 2.7 冻结方式对海鲈鱼蛋白热稳定性的影响

如图6所示，每种冷冻方式处理的鱼肉样品均呈现2个吸热峰。其中，峰I为肌球蛋白的热变性温度，峰II为肌动蛋白的热变性温度<sup>[29]</sup>。由表3可知，复配载冷剂冻结鱼肉肌球蛋白和肌动蛋白的变性温度高于其他组，但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。观察各组变性焓值可以发现，复配载冷剂冻结鱼肉肌动蛋白的变性焓值显著高于其他组 ( $P < 0.05$ )，表明复配载冷剂冻结鱼肉蛋白质变性更难，组织中蛋白结构更稳定。这是由于液体冷冻的

冻结速率更快, 低温速冻有助于形成均匀冰晶, 肌肉组织损伤更小, 更利于维持鱼肉蛋白质的热稳定性。Zhang Chao等<sup>[30]</sup>研究超声辅助浸泡冷冻法对鸡胸肉在冷冻贮藏过程中蛋白质氧化、结构和热稳定性的影响, 发现相比空气冻结, 浸入式冷冻处理可以有效减缓蛋白质氧化和蛋白质热稳定性损失, 与本研究结果一致。此外, Sun Qinxiu等<sup>[31]</sup>研究液体冷冻及超声辅助冷冻处理鲤鱼也发现, 液体冷冻处理可减少鲤鱼在长期冷冻贮藏期间的蛋白质结构变化。

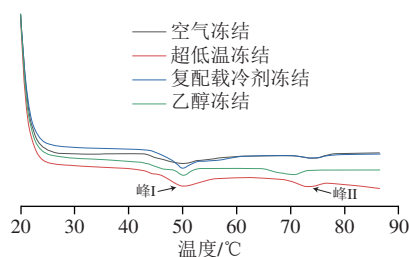


图6 冻结方式对海鲈鱼蛋白DSC曲线的影响

Fig. 6 Effect of freezing methods on the DSC curve of sea bass

表3 不同冻结方式下鱼肉变性温度 ( $T_{max}$ ) 和热焓 ( $\Delta H$ ) 的变化

Table 3 Effect of freezing methods on the thermal denaturation temperature and enthalpy change of sea bass

冷冻方式	峰I		峰II	
	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_1/(\text{J/g})$	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_2/(\text{J/g})$
空气冻结	49.90±0.08 <sup>a</sup>	1.38±0.31 <sup>a</sup>	74.56±0.04 <sup>a</sup>	0.30±0.02 <sup>c</sup>
超低温冻结	50.00±0.12 <sup>a</sup>	1.64±0.20 <sup>a</sup>	73.52±0.47 <sup>a</sup>	0.39±0.03 <sup>b</sup>
复配载冷剂冻结	50.01±0.19 <sup>a</sup>	1.72±0.19 <sup>a</sup>	74.83±0.07 <sup>a</sup>	0.66±0.01 <sup>a</sup>
乙醇冻结	49.68±0.38 <sup>a</sup>	0.88±0.09 <sup>b</sup>	72.01±1.47 <sup>b</sup>	0.32±0.03 <sup>c</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 3 结论

乙醇、丙二醇、海藻糖水溶液作为复配载冷剂显著提高了海鲈鱼的冷冻速率, 缩短跨越最大冰晶生成带时间, 肌肉组织间形成了细小冰晶, 有利于保持肌肉组织结构。同时, 复配载冷剂处理减少了鱼肉肌肉组织中不易流动水向自由水的迁移, 表现出更好的保持鱼肉鲜度的优势, 且蛋白质结构更稳定。本研究发现含体积分数20%乙醇、体积分数20%丙二醇、5 g/100 mL海藻糖的水溶液作为复配载冷剂可以有效减缓冷冻海鲈鱼的品质劣变, 为低温液态速冻技术在水产品中的进一步开发应用及冷冻水产品的冻藏品质保持提供了参考。

#### 参考文献:

[1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022: 17-18.  
 [2] TIAN Y, ZHU Z W, SUN D W. Naturally sourced biosubstances for regulating freezing points in food researches: fundamentals,

current applications and future trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 95: 131-140. DOI:10.1016/j.tifs.2019.11.009.  
 [3] WU X F, ZHANG M, 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): 3620-3631. DOI:10.1080/10408398.2015.1132670.  
 [4] 赵茜, 李学鹏, 王金厢, 等. 低温液态速冻技术及其在水产品加工中应用研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 189-193; 217. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2020.12.038.  
 [5] YANG F, JING D T, DIAO Y D, et al. Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) filets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108762. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108762.  
 [6] ZHANG C, LI Y X, XIA X F, et al. Changes in muscle quality and physicochemical characteristics of chicken breast subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during long-term frozen storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 142: 10-18. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2022.06.020.  
 [7] JIA H, ROY K, PAN J F, et al. Icy affairs: Understanding recent advancements in the freezing and frozen storage of fish[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 1383-1408. DOI:10.1111/1541-4337.12883.  
 [8] LU N, MA J, SUN D W. Enhancing physical and chemical quality attributes of frozen meat and meat products: mechanisms, techniques and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 63-85. DOI:10.1016/j.tifs.2022.04.004.  
 [9] FIKIIN K, AKTERIAN S. A lauded refrigeration technique and resource-efficiency of frozen food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 185-187. DOI:10.1016/j.tifs.2022.05.008.  
 [10] 曾庆孝, 李沛生, 陈中, 等. 食品加工与保藏原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 157-158.  
 [11] STEBEL M, SMOLKA J, PALACZ M, et al. Numerical modelling of conjugate heat and mass transfer during hydrofluidisation food freezing in different water solutions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102898. DOI:10.1016/j.ifset.2021.102898.  
 [12] QIAN Pan, ZHANG Yiqi, 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. DOI:10.1111/jfpp.13640.  
 [13] 李晓燕, 陈杰, 樊博玮, 等. 浸渍式冷冻技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 307-312. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024094.  
 [14] ZHAO Xi, LI Hongyue, CUI Fangchao, et al. Effects of four multi-compound freezing medium on the quality of red drum (*Sciaenops ocellatus*) during frozen storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57: 4400-4410. DOI:10.1111/ijfs.15771.  
 [15] 张楠楠, 蓝蔚青, 黄夏, 等. 迷迭香复配液对大黄鱼冰藏品质及水分迁移影响[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 255-261. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180125-340.  
 [16] CARECHE M, SÁNCHEZ-ALONSO I, MARTINEZ I. Estimation of quality in frozen fish by low field NMR[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 11(4): 1-16. DOI:10.1007/978-3-319-28275-6\_83-1.  
 [17] WANG Yueqi, ZHANG Tao, CHEN Qian, et al. Effects of immersion freezing with coolant on the quality of grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* × *Epinephelus lanceolatus*) during frozen storage[J]. CyTA-Journal of Food, 2021, 19(1): 634-644. DOI:10.1080/19476337.2021.1946159.

- [18] WU Zeyu, MA Wanru, XIAN Zhaojun, et al. The impact of quick-freezing methods on the quality, moisture distribution and microstructure of prepared ground pork during storage duration[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 78: 105707. DOI:10.1016/j.ulsonch.2021.105707.
- [19] QIU S, CUI F C, WANG J X, et al. Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and myofibrillar protein oxidation and denaturation in *Sciaenops ocellatus*[J]. *Food Chemistry*, 2022, 377: 131949. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131949.
- [20] CHEN X Q, LIU H Y, LI X X, et al. Effect of ultrasonic-assisted immersion freezing and quick-freezing on quality of sea bass during frozen storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112737. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112737.
- [21] 卞欢, 吴莹慧, 闫征, 等. 无磷保水剂对速冻鲫鱼质构特性的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(2): 86-91. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191203-289.
- [22] ZHU S C, YU J H, CHEN X, et al. Dual cryoprotective strategies for ice-binding and stabilizing of frozen seafood: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 223-232. DOI:10.1016/j.tifs.2021.02.069.
- [23] LIU Shulai, ZENG Xiaohong, ZHANG Zhenyu, et al. Effects of immersion freezing on ice crystal formation and the protein properties of snakehead (*Channa argus*)[J]. *Foods*, 2020, 9(4): 411. DOI:10.3390/foods9040411.
- [24] 李新, 汪兰, 丁安子, 等. 液氮/液氨速冻鲷鱼片理化性质与组织结构变化[J]. *肉类研究*, 2020, 34(10): 64-69. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200619-156.
- [25] INDERGÅRD E, TOLSTOREBROV I, LARSEN H, et al. The influence of long-term storage, temperature and type of packaging materials on the quality characteristics of frozen farmed Atlantic Salmon (*Salmo salar*)[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 41: 27-36. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2013.05.011.
- [26] SUN Qinxu, ZHAO Xinxin, ZHANG Chao, et al. Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 108: 106-112. DOI:10.1016/j.lwt.2019.03.042.
- [27] MA Xuan, YANG Dazhang, QIU Weiqiang, et al. Influence of multifrequency ultrasound-assisted freezing on the flavour attributes and myofibrillar protein characteristics of cultured large yellow croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 779546. DOI:10.3389/fnut.2021.779546.
- [28] 石钢鹏, 高天麒, 钱晓庆, 等. 不同速冻处理方式对大口黑鲈鱼肉冻藏期间品质变化影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(12): 68-74. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201113-264.
- [29] ZHANG M C, NIU H L, CHEN Q, 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.10.005.
- [30] ZHANG Chao, LI Yuexin, XIA Xiufang, et al. Changes in protein oxidation, structure, and thermal stability of chicken breast subjected to ultrasound-assisted immersion freezing during frozen storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 398: 133874. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133874.
- [31] SUN Qinxu, KONG Baohua, LIU Shucheng, et al. Ultrasonic freezing reduces protein oxidation and myofibrillar gel quality loss of common carp (*Cyprinus carpio*) during long-time frozen storage[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 629. DOI:10.3390/foods10030629.