DOI:10.12441/spyswjs.20240309001 [文章编号] 1673-1689(2024)08-0151-09

冻结方式对鲈鱼片品质的影响

温 馨 李娅迪 张世同 王紫暄 张 捷* 周 鹏

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:为了减少鲈鱼在冷冻过程中的品质劣变,研究了空气冻结(组别AF-7、AF-20、AF-40、AF-60)、浸渍冻结(组别IF-20、IF-40)和液氮冻结对鲈鱼片品质的影响。分析不同冷冻方式处理后样品的冰晶结构、微观组织结构、质构、解冻损失、水分分布、挥发性盐基氮(TVB-N)、*K*值等品质相关指标。结果表明,当冻结速率加快时,硬度、弹性呈上升趋势,冰晶当量直径、TVB-N和*K*值呈下降趋势。虽然不同处理组均出现了品质劣变,但液氮冻结组和IF-40组的鲈鱼片品质最好,液氮冻结组与新鲜样品最为接近。冻结温度相同时,浸渍冻结比空气冻结的冻结速率快,可有效抑制冰晶生长,减少了质构、TVB-N、*K*值等品质指标的改变。相比而言,液氮冻结对缓解鲈鱼片冷冻过程中品质劣变的效果更好。

关键词:鲈鱼;液氮冻结;*K*值;冰晶结构;质构

Effect of Freezing Methods on the Quality of Perch Fillets

WEN Xin LI Yadi ZHANG Shitong WANG Zixuan ZHANG Jie ZHOU Peng*

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to reduce the quality deterioration of perch fillets during freezing, the effects of air freezing (groups AF-7, AF-20, AF-40, AF-60), immersion freezing (groups IF-20, IF-40), and liquid nitrogen freezing on the quality of perch fillets were discussed. Quality-related indicators including ice crystal structure, microstructure, texture, thawing loss, moisture distribution, total volatile base nitrogen (TVB-N), *K*-value, and others were analyzed for samples subjected to different freezing methods. The results showed that as the freezing rate increased, the hardness and elasticity showed an upward trend, while the ice crystal equivalent diameter, TVB-N, and *K*-value tended to decrease. Although quality deterioration was observed across different treatment groups, the liquid nitrogen freezing group and the IF-40 group effectively preserved the quality characteristics of perch fillets, with the liquid nitrogen freezing group most closely resembling the fresh sample group. Under the same freezing temperature, immersion freezing achieved a faster freezing rate than air freezing, effectively inhibiting ice crystal growth and reducing changes in texture, TVB-N, and *K*-value. In comparison, liquid nitrogen freezing proved most effective in alleviating quality deterioration of perch fillets during freezing.

Keywords: perch; liquid nitrogen freeing; *K*-value; ice crystal structure; texture

鲈鱼是我国重要的淡水鱼类之一,其脂肪质量分数低、蛋白质种类丰富,且含有矿物质、维生素、必需氨基酸和必需脂肪酸等多种营养物质。因其水分质量分数较高,在冷冻过程中易受微生物和内源酶的影响,引起品质劣变[1]。为了降低鲈鱼的品质劣变,通常使用不同的冷冻方式以延长其保质期[2-3],但是鲈鱼在冷冻过程中仍会发生品质劣变。在冷冻过程中,冰晶的形成和生长会对细胞和组织造成机械损伤并形成冷冻浓缩效应,加快鲈鱼体内的生化反应速率并影响相关理化指标,如汁液损失、蛋白质变性、ATP代谢等[4]。

冷冻食品的品质与冰晶大小、形态和分布密切

通信作者:张捷(1988—),女,博士,讲师,主要从事食品加工与营养研究。E-mail:8202206006@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2024-03-09 **修回日期:**2024-04-29

相关。研究表明，缓慢冻结如空气冻结（air freezing，AF）容易形成大而不规则的细胞外冰晶，会对细胞产生较大的机械损伤；快速冻结使细胞内和细胞外形成细小冰晶，且均匀分布在肌纤维内，从而减小对细胞的机械损伤[5-6]。因此，速冻通常用于冷冻水产品的保鲜。浸渍冻结（immersion freezing，IF）和液氮冻结使用液体冷却剂作为传热介质，由于其高传热系数而具有较高的冻结速率，进而改善了冷冻食品的品质。Teng 等[7]研究发现，使用液氮冻结到−80 ℃能有效改善冷冻太平洋牡蛎的品质。曹蓉露等[8]研究发现，液氮冻结组的硬度、弹性下降程度最小，更有利于保持龙头鱼的品质。

为了揭示冷冻速率对鲈鱼片品质特性的影响，探究了不同冻结方式对鲈鱼片理化指标的影响，为鲈鱼片冷冻过程中的品质变化提供理论依据，并为改善鲈鱼片冷冻过程中的品质劣变提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

新鲜鲈鱼：无锡市京沪时代超市。敲击头部使鲈鱼晕厥，去鳞、去内脏，对半切开，去除鱼骨，冲洗干净，得到长 15 cm、宽 11 cm 的鱼片，质量为（115±10）g。

无水乙醇、高氯酸、二甲苯、切片石蜡、三氯甲烷、冰醋酸、甲醛水溶液、硼酸、碳酸钾、甘油、甲基红、溴甲酚绿：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司；阿拉伯胶：分析纯，美国 Sigma 公司；盐酸标准滴定溶液（0.009 7 mol/L）：分析纯，广州臻萃质检技术服务有限公司；苏木素−伊红染液（HE）：上海碧云天生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

−7 ℃冰箱：BD-228WL 型，青岛海尔股份有限公司；−20 ℃冰箱：BC/BD-301HD 型，青岛海尔股份有限公司；−40 ℃冰箱：DW/BD-55W321EU1 型，青岛海尔股份有限公司；−60 ℃冰箱：DW/BD-55W321 EU1 型，青岛海尔股份有限公司；低温恒温槽：XODC-4030 型，南京先欧仪器制造有限公司；高精度接触式温度计：UT322 型，优利德集团有限公司；核磁共振成像分析仪：MesoMR23-060V-I 型，上海纽迈电子科技有限公司；电子天平：EL204 型，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；电子天平：PL2002 型，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；物性分析仪：TA.XT-Plus 型，英国 Stable Micro System 公司；高速分散机：T18 basic 型，德国 IKA 公司；石蜡包埋机：1150H 型，德国徕卡公司；冰冻切片机：CM1950 型，德国徕卡公司；光学显微镜：DM2000 型，德国徕卡公司；高效液相色谱（HPLC）仪：Waters 1525EF 型，美国 Waters 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样本分组

将处理好的鲈鱼片装入无菌袋，随机分为 8 组，新鲜鲈鱼片为对照组；空气冻结 AF-7 组处理方式：将样品置于−7 ℃冰箱冷冻 72 h；空气冻结 AF-20、AF-40、AF-60 组处理方式：将样品分别置于−20、−40、−60 ℃冰箱冷冻 72 h；浸渍冻结 IF-20、IF-40 组处理方式：将样品置于−20、−40 ℃低温恒温槽（内置无水乙醇）储存 72 h；液氮冻结组处理方式：将样品置于液氮冻结箱中，冷冻至中心温度到达−20 ℃，再于−20 ℃冰箱储存 72 h。

1.3.2 冻结曲线

冻结曲线的测定参考 Wu 等[9]的方法并稍加修改。在鱼片中心位置插入热电偶探头后装入自封袋，分别置于−7、−20、−40、−60 ℃冰箱，−20、−40 ℃低温恒温槽（内置无水乙醇）和装有液氮的冷冻箱中。采用热电偶实时记录不同冻结过程中鲈鱼片的中心温度。以冻结时间为横坐标，中心温度为纵坐标绘制鲈鱼片的冻结曲线。

1.3.3 冰晶分布

采用 Li[10]和 Sun 等[11]的方法并稍加修改。将不同冻结方式处理后的鲈鱼片（取鱼背部分）在−20 ℃的冷冻板上切成 5 mm×5 mm×3 mm 的立方体，直接浸入提前冷冻（−20 ℃）的 Carnoy 溶液（无水乙醇、氯仿、冰醋酸的体积比为 6∶3∶1）中，并在−20 ℃下保存 24 h，以固定鱼肉组织形态。固定完成后转入室温环境进行组织脱水操作，取出样品沥干，分别浸入体积分数 70%、85%、95% 的乙醇中脱水 30 min，再转入无水乙醇中脱水 2 次，每次 15 min。脱水结束后将样品浸没于二甲苯中透明组织 2 次，每次 20 min，使组织块透明。然后浸入 65 ℃的熔融石蜡中，在烘箱内浸蜡 2 次，每次 1.5 h。浸蜡完成后进行包埋、切片，再将样品放在 65 ℃烘箱中加热 1 h，使石蜡融化。接着进行 HE 染色，最后用光学显微镜观察并拍摄典型的组织图像，观察

倍数为10倍。应用图像分析软件Image pro plus 6.0分析横截面冰晶相对面积和当量直径以评价冰晶特性。

1.3.4 微观组织结构

采用Diao等[12]的方法并稍加修改。将鲈鱼片置于4 ℃冰箱中解冻12 h，将解冻后的鲈鱼片（取鱼背肉）切成5 mm×5 mm×3 mm的立方体，在多聚甲醛（质量分数4 %）中浸泡24 h以固定肌肉纤维。固定后的样品在室温下用体积分数75 %的乙醇脱水，在二甲苯中透明组织2次，每次20 min，使组织块透明。在65 ℃的熔融石蜡中浸蜡2次，每次1.5 h。浸蜡完成后进行包埋、切片，再将样品放在65 ℃烘箱中加热1 h，使石蜡融化。接着进行HE染色，最后用光学显微镜观察并拍摄典型的组织图像，观察倍数为5倍。

1.3.5 质构的测定

采用杨冰等[13]的方法并稍加修改。鲈鱼蒸制完成后去除表面鱼皮，在保持鱼体结构完整的情况下以背部鱼肉为研究对象，测定部位以背鳍下部、侧线以上为主。质构仪测定参数：采用P5探头，测前速度为1 mm/s，测中及测后速度均为2 mm/s，触发力为10 g，第一次下压3 mm，静止30 s后进行第二次下压，下压距离为7 mm。共设定3组平行，每组测定6次，计算弹性和硬度。

1.3.6 解冻损失率的测定

参照Li[14]和Sun等[11]的方法并稍加修改。各组样品冻结完成后称质量。将各组样品置于4 ℃冰箱中冷藏解冻12 h，解冻后取出，吸干样品表面水分称样品质量。解冻损失率计算见公式（1）。

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

式中：

X——解冻损失率，%；

m_1——样品冻结完成后的质量，g；

m_2——吸干样品表面水分后的样品质量，g。

1.3.7 水分分布测定

水分分布的测定参照赵波等[15]的方法并稍加修改。使用CPMG序列，各参数设定如下：P1=7.52 μs，P2=15.04 μs，TD=240 026，PRG=3，RFD=0.080 ms，TE=0.200 ms，TW=2 500 ms，NECH=6 000，NS=4。将测得的数据进行反演，得到各组中水分的弛豫时间及峰面积、峰比例等。

1.3.8 TVB-N测定

TVB-N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》中的微量扩散法进行。称取5 g搅碎样品于烧杯中，加入25 mL去离子水，浸渍30 min后过滤备用。在扩散皿边缘均匀涂上水溶性胶，加入硼酸和溴甲酚绿指示剂，并加入滤液及饱和碳酸钾溶液，用磨砂玻璃盖密封后，于37 ℃静置2 h。用盐酸标准滴定溶液滴定，结果以mg/100 mg表示。

1.3.9 K值

采用HPLC法测定鲈鱼片的K值，参照Wei等[16]的方法并稍加修改。取2.0 g搅碎的肉，与20 mL体积分数为5 %的高氯酸混合均匀，均质30 s，并在4 ℃下以8 000 r/min离心10 min，收集上清液。上清液pH调至6.0~6.4。将已调节pH的上清液转移至预冷的容量瓶中，用4 ℃的水定容至50 mL，取1 mL溶液过0.22 μm微孔滤膜，滤液于4 ℃下保存，采用HPLC进行分析。K值计算见公式（2）。

$$K=\frac{(b_{HxR}+b_{Hx})}{(b_{ATP}+b_{ADP}+b_{AMP}+b_{IMP}+b_{HxR}+b_{Hx})}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

K——次黄嘌呤核苷酸与次黄嘌呤之和占腺苷三磷酸及其分解物总量的百分率，%；

b_{ATP}——ATP的质量摩尔浓度，μmol/g；

b_{ADP}——ADP的质量摩尔浓度，μmol/g；

b_{AMP}——AMP的质量摩尔浓度，μmol/g；

b_{IMP}——IMP的质量摩尔浓度，μmol/g；

b_{HxR}——HxR的质量摩尔浓度，μmol/g；

b_{Hx}——Hx的质量摩尔浓度，μmol/g。

1.3.10 数据处理

数据采用IBM SPSS Statistics 26进行单因素分析、邓肯方差分析，同时使用Origin 2024软件进行图表绘制。

2 结果与讨论

2.1 冻结曲线

冷冻过程一般可以分为3个阶段：预冷阶段（不冻结）、相变阶段（冻结平台）和过冷阶段（最终冷却）[17]，其中相变阶段最为重要，该阶段涉及样品中的水分由水向冰的转化，决定了冷冻速率和冷冻产品的品质特性。在相变阶段会出现一段较为平缓的曲线，这是由于冷冻过程中晶核向冰晶

转变并释放潜热。当冷冻中的鱼肉通过最大冰晶生成带(−5~0 ℃)后,鱼肉内 80% 以上的水分会被冻结[18]。

如图 1(a)所示,冷冻速率从大到小依次为:液氮冻结>IF-40>IF-20>AF-60>AF-40>AF-20>AF-7。AF-7 和 AF-20 的曲线在 0 ℃都呈现出一段极为平缓的阶段,而液氮冻结、IF-40、IF-20 因初始温差大、热交换剧烈,温度曲线几乎呈垂直下降趋势。如图 1(b)所示,各冻结方式下鱼肉通过最大冰晶生成带(−5~0 ℃)的时间如下:液氮冻结为 18 s,IF-40 为 5 min,IF-20 为 7 min,AF-60 为 46 min,AF-40 为 70 min,AF-20 为 225 min,AF-7 为 700 min。与其他组相比,液氮冻结组通过最大冰晶生成带的时间最短。IF-40 组较 AF-40 组通过最大冰晶生成带的时间缩短了 65 min,IF-20 组较 AF-20 组通过最大冰晶生成带的时间缩短了 218 min。说明在相同冻结温度下,浸渍冻结具有更快的冻结速率。林国荣等[19]研究了鲍鱼在不同冷冻方式下的冻结速率,结果显示液氮冻结的冻结速率最快,优于其他方式。

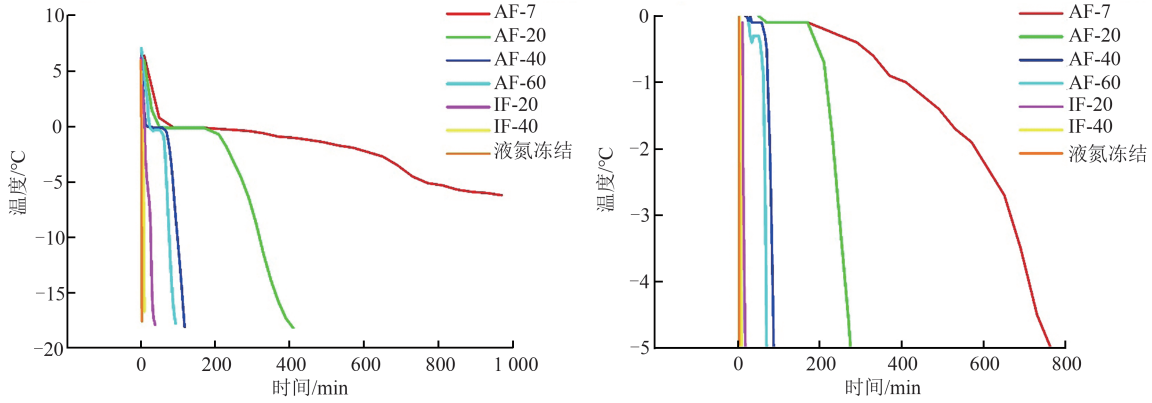


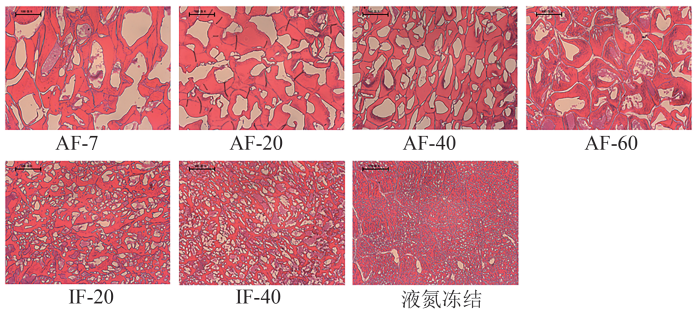
图 1 不同冻结方式下鲈鱼的冻结曲线及通过最大冰晶生成带的时间

Fig. 1 Freezing curves of perch and the time taken to reach the zone of maximum ice crystal formation under different freezing methods

2.2 冰晶分布

冰晶生长是冻结过程中造成冻品肌肉纤维结构受损、持水力下降、色泽和质构变差等品质劣变的重要原因[4]。而冻结速率对冰晶尺寸、数量和分布形态有重要作用,大冰晶更易对细胞造成机械损伤,引起肌肉组织结构受损变形,降低食品品质[5,20]。如图 2 所示,空气冻结后的样品中存在不规则、大而不均匀的冰晶,细胞内部出现较大冰晶造成的空白区域,更易使细胞产生不可逆的组织破裂和细胞内容物泄漏,进一步引起肌原纤维的扭曲变形,降低鱼肉品质[5,20]。通过液氮冻结和浸渍冻结处理的样品中,形成的冰晶细小而均匀,肌纤维间隙较小,结构更加致密,肌纤维分布较均匀和规则。

如图 3 所示,在 AF-7 组中,缓慢的冷冻速率使

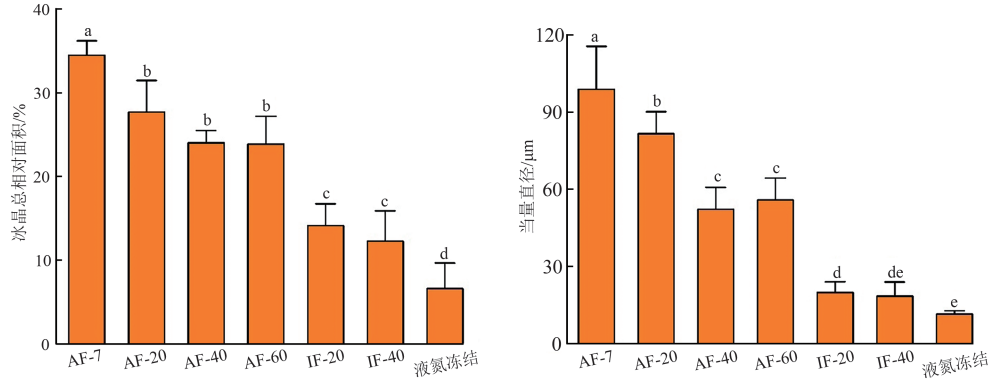


图片标尺为 100 μm,放大倍数为 10 倍。

图 2 冻结方式对鲈鱼片中冰晶分布的影响

Fig. 2 Effect of freezing methods on the ice crystal distribution in perch fillets

得鱼肉肌纤维间形成较大冰晶，当量直径和冰晶总相对面积显著高于其他处理组（P<0.05）。IF-20组和IF-40组的当量直径分别为（19.87±4.11）μm和（18.45±5.49）μm，冰晶总相对面积分别为（14.11±2.61）%、（12.27±3.61）%，这两组的指标间无显著差异（P<0.05）。IF-40组与AF-40组相比，当量直径缩小了64.48%，IF-20组的当量直径较AF-20组缩小了75.61%，表明在相同冻结温度下，浸渍冻结有利于形成小而均匀的冰晶，减少冰晶对细胞结构的机械损害。液氮冻结时，快速冷冻使样品中形成小而均匀的冰晶，当量直径和冰晶总相对面积均显著低于其他处理组（P<0.05）。冻结速率的加快对鲈鱼片中冰晶的形成情况有显著影响，在极快速冷冻条件下，生成的冰晶较小且均匀，多分布于细胞内，对肌肉组织的破坏程度最小。Diao等[12]研究发现，冻藏4周后，空气冻结（AF-30）、浸渍冻结（IF-30）和液氮冻结（LNF）冰晶的横截面积分别为（6 799±750）、（1 191±60）、（3 796±309）μm^2，LNF鱼片中的冰晶明显小于IF和AF鱼片中的冰晶（P<0.05），这与该研究的结果一致。



(a) 冰晶总相对面积　　(b) 当量直径

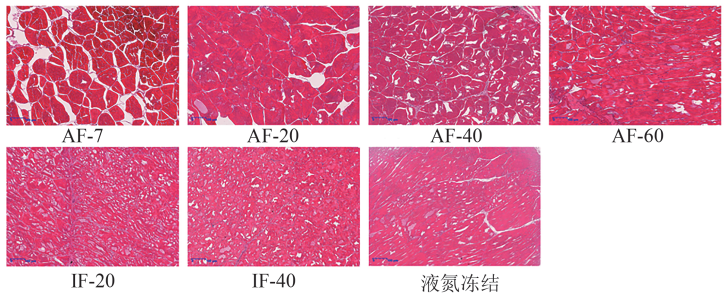
不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图3　冻结方式对鲈鱼片冰晶总相对面积和当量直径的影响

Fig. 3　Effect of freezing methods on the total relative area and equivalent diameter of ice crystals in perch fillets

2.3　微观组织结构分析

由图4可知，不同冻结速率对鲈鱼片的细胞结构有显著影响。随着冻结速率的增加，样品微观组织结构的细胞间隙呈现逐渐减小的趋势。AF-7组样品的细胞间隙最大，细胞被挤压变形，肌纤维出现一定程度的偏移[10]。这可能是因为冷冻期间肌纤维互相分离降解，出现了不同程度的扭曲变形，促使组织结构逐渐断裂崩坏。液氮冻结组和IF-40组样品的肌原纤维较为整齐致密，细胞结构较为完整，这是由于冻结速率较快时，形成了细小且均匀的胞内冰晶，对肌原纤维和细胞结构造成的破坏较小。向迎春等[21]研究表明，液氮冻结样品的组织内冰晶小而均匀，细胞组织间隙细小紧密；而冰柜冻结样品的组织内出现不同程度的大孔洞和细胞损坏，肌肉组织出现扭曲变形。



图中标尺为100 μm，放大倍数为5倍。

图4　冻结方式对鲈鱼片微观组织结构的影响

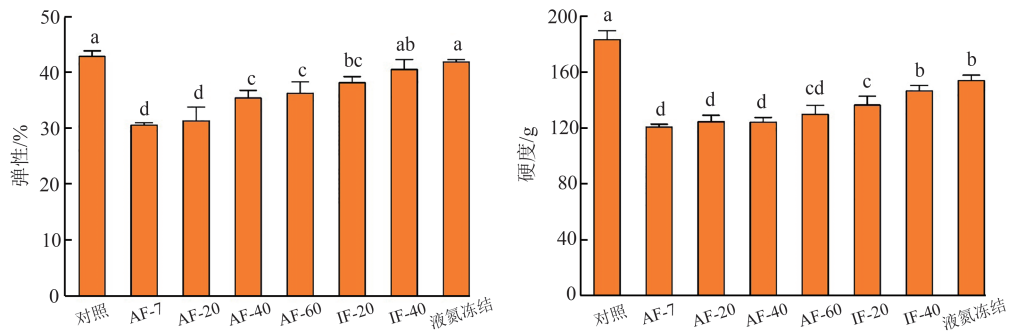
Fig. 4　Effect of freezing methods on the microstructure of perch fillets

2.4 质构分析

质地是消费者评价水产品质量的重要指标之一[22]。硬度和弹性与肌肉组织的结构完整性、持水能力、蛋白质状态密切相关，影响着肉制品的口感。

如图5(a)所示，液氮冻结组、IF-40组与对照组的弹性无显著差异，而其他组样品的弹性均显著低于对照组(P<0.05)。液氮冻结组弹性变化的幅度最小，这可能是由于快速冷冻产生的冰晶细小而均匀，减少了对细胞结构的破坏。而AF-7、AF-20组的弹性下降幅度较大，可能是由于空气冷冻的传热系数较低，形成的冰晶体积较大，对肌肉结构的破坏较为明显。

如图5(b)所示，不同处理组与对照组相比，硬度均显著降低(P<0.05)，且液氮冻结组和IF-40组的硬度显著高于其他组。AF-7组的硬度急剧下降，可能是由于鱼肉内生成的冰晶尺寸较大，造成肌肉纤维的变形与蛋白质的凝聚，进而导致肌肉蛋白质从Z线和M线上脱离[23]。组织间紧密程度下降使肉质变得松软，柔软肉质的弹性也有所降低。液氮冻结组的当量直径较小，冰晶分布均匀，有效减少了肌纤维的扭曲和变形，从而保持了鲈鱼片的硬度。Zhou等[24]研究发现，在储藏初期，冰箱冷冻(RF)组的硬度和弹性均显著低于浸渍冻结和磁场辅助浸渍冻结(MIF)组(P<0.05)。综上所述，液氮冻结组和IF-40组能更好地保持鱼肉的质构品质，使鱼肉坚实且富有弹性。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

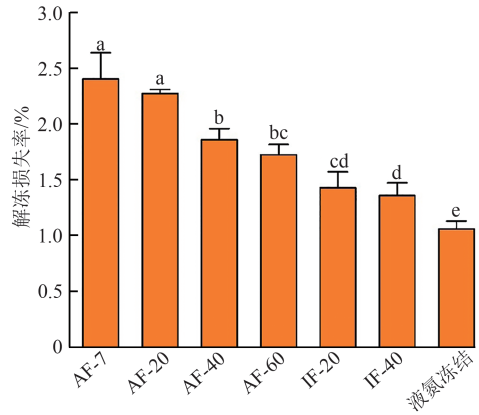
图5 冻结方式对鲈鱼片弹性和硬度的影响

Fig. 5 Effect of freezing methods on the elasticity and hardness of perch fillets

2.5 解冻损失分析

冷冻过程中的冰晶生长造成了肌原纤维收缩和破坏，蛋白质氧化导致其结构遭到损伤，从而导致解冻过程中细胞内促氧化部分的水分不能被肌纤维重新吸收，而是以渗出物的形式流出[25-26]，水分和其他营养物质也有进一步损失[14]。因此，解冻损失是评价冷冻肉制品质量变化的重要指标[27]。

如图6所示，各冻结处理组均造成了鲈鱼片的解冻损失，其损失率为1.0%~2.5%。液氮冻结组的解冻损失率显著低于其他组(P<0.05)，这是因为液氮冻结时降温速率较快，使样品迅速通过最大冰晶生成带，从而形成了大量细小而均匀的胞内冰晶，对肌肉组织和细胞结构的破坏较小。而AF-7组和AF-20组的解冻损失率显著高于其他组(P<0.05)，这是因为冻结速率较慢时，形成的较大冰晶破坏了细胞的结构，促使细胞内的水分和营养物质流失；在4 ℃的解冻过程中，破损的细胞膜和受损的组织结构导致样品对水分的重吸收能力减弱，水分流失严重。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

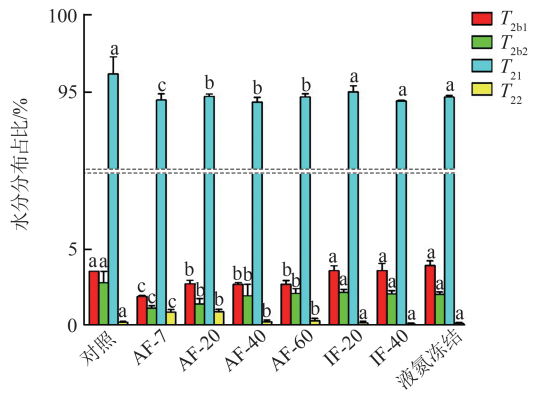
图6 冻结方式对鲈鱼片解冻损失率的影响

Fig. 6 Effect of freezing methods on thawing loss of perch fillets

2.6　水分分析

水分分布是解释食物质量和持水能力的重要指标[28]。低场核磁共振技术多以氢原子核（^{1}H）为研究对象，^{1}H由高能态向低能态非辐射转变的过程称为弛豫，肉及肉制品弛豫时间的测量通常采用氢质子的横向弛豫时间（T_2）表示。T_2越短说明水分与样品的结合程度越紧密，其中T_{2b1}和T_{2b2}（1~10 ms）代表与大分子蛋白质侧链和亲水基团紧密结合的结合水；T_{21}（10~100 ms）代表固定在肌原纤维网络结构中的不易流动水；T_{22}（>100 ms）代表肌原纤维间的自由水。

如图7所示，鱼肉样品中的不易流动水（T_{21}）占比最大，达到90%以上。与对照组相比，AF-7、AF-20、AF-40、AF-60组样品的结合水、不易流动水均显著降低，自由水显著增加（P<0.05），这可能是由于在空气冻结中部分结合水和不易流动水转变为了自由水。与对照组相比，IF-20、IF-40、液氮冻结组的结合水、不易流动水和自由水的峰比例均无显著差异（P<0.05），这可能是由于较快的冻结速率阻止了冷冻过程中肌原纤维的变性，从而限制结合水和不易流动水转变为自由水。



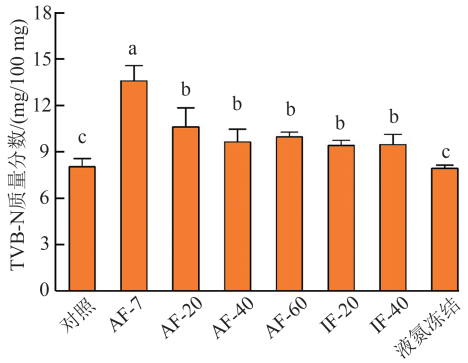
不同小写字母表示同一指标的不同组间差异显著（P<0.05）。

图7　冻结方式对鲈鱼片中水分分布的影响

Fig. 7　Effect of freezing methods on the moisture distribution in perch fillets

2.7　TVB-N分析

TVB-N是指在酶和微生物的作用下，蛋白质及其他含氮化合物分解产生的具有挥发性的含氮物质，可以用来评价水产品的新鲜程度[29]。如图8所示，鲈鱼片经过不同冷冻条件处理并解冻后，TVB-N质量分数最高的是AF-7组，最低的是液氮冻结组，而其他各组之间没有显著差异。AF-7组的TVB-N质量分数显著高于其他组（P<0.05），可能是由于AF-7形成的冰晶体积最大，对细胞造成了较强的机械损伤，细胞破裂使含氮物质从细胞内流出，导致TVB-N质量分数增加。液氮冻结组样品的TVB-N质量分数最低，表明液氮冻结组样品最新鲜。根据我国卫生标准，淡水鱼虾挥发性盐基氮质量分数超过20 mg/100 mg时，即认为是变质，因此，不同冻结速率冷冻的鲈鱼片在72 h内均保持良好的新鲜度。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图8　冻结方式对鲈鱼片中TVB-N质量分数的影响

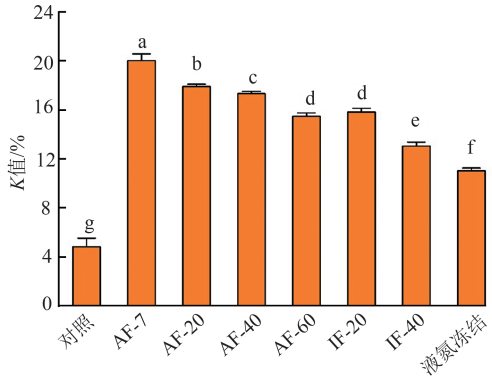
Fig. 8　Effect of freezing methods on the TVB-N mass fraction in perch fillets

2.8　K值分析

K值能反映鱼体死后从僵硬到自溶阶段ATP降解反应进行的程度，从而表征其新鲜度，K值越小表示ATP降解程度越低，新鲜度越好[30]。K值与TVB-N均为反映鱼类新鲜度的指标，但由于K值是以核苷酸的分解产物作为鱼类新鲜度的判定指标，ATP对环境影响较为敏感，在鱼体死亡后降解速度较快，故更能反映鱼类贮藏初期的腐败速度。根据卫生标准，K值≤20%表示鱼体绝对新鲜，K值≥40%表示鱼体开始腐败变质。

由图9可知，与新鲜鱼体相比，不同冻结方式处理后鱼体的K值均呈显著增加趋势（P<0.05），其中液氮冻结组与新鲜样品组最为接近，且液氮冻结组的K值较AF-7组降低了44.85%，这可能是因为液氮冻结使细胞内产生细小冰晶，降低了机械损伤，细胞更完整，从而进一步抑制微生物生长和酶的作用。IF-20组的K值较AF-20组降低了11.57%，IF-40组的K值较AF-40组降低了24.71%，表明在相同冻结温度下，浸渍冻结的冻结速率更快，形成的冰晶更小，在维持鲈鱼的新鲜程度方面

更具优势。综上所述，快速冻结可以有效减慢ATP的降解速度，对于短期冻藏保鲜有显著作用。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图9 冻结方式对鲈鱼片中K值的影响

Fig. 9 Effect of freezing methods on the K-value in perch fillets

3 结论

为减少鲈鱼在冷冻过程中的品质劣变，探究了鲈鱼片在空气冻结（AF-7、AF-20、AF-40、AF-60）、浸渍冻结（IF-20、IF-40）和液氮冻结过程中冰晶结构、微观组织结构、质构、解冻损失、水分分布等品质相关的指标变化。在不同的冻结方式下，随着冻结速率加快，硬度、弹性呈上升趋势，冰晶当量直径呈下降趋势。液氮冻结和IF-40组通过最大冰晶生成带的时间较短，冰晶面积占比较低，冰晶尺寸较小且分布较为均匀，多为胞内冰晶，对肌肉纤维和细胞结构损伤较小。因此，液氮冻结组和IF-40组能有效缓解鲈鱼片在冷冻过程中的品质劣变，且液氮冻结的样品与新鲜样品更为接近。冻结温度相同时，浸渍冻结比空气冻结的冻结速率快，可更好地抑制冰晶生长，减少解冻损失率、质构、K值和TVB-N等指标的变化。在低场核磁共振技术检测中发现，液氮冻结和浸渍冻结处理组中结合水、不易流动水和自由水与对照组无显著差异（$P<0.05$），而空气冻结处理组与对照组有显著差异，表明液氮冻结和浸渍冻结能有效阻止水分迁移。综上所述，液氮冻结在保持鲈鱼片质构、持水力等品质以及延缓鲈鱼片的腐败变质等方面表现良好。

参考文献

[1] YU H，XIE J. Effect of different orthogonal double frequency ultrasonic assisted freezing on the quality of sea bass[J]. Food Chemistry，2023，18：100704.

[2] SÁNCHEZ-VALENCIA J，SÁNCHEZ-ALONSO I，MARTINEZ I，et al. Estimation of frozen storage time or temperature by kinetic modeling of the Kramer shear resistance and water holding capacity（WHC）of Hake（*Merluccius merluccius*，L.）muscle[J]. Journal of Food Engineering，2014，120：37-43.

[3] AGUILERA BARRAZA F A，LEÓN R A Q，ÁLVAREZ P X L. Kinetics of protein and textural changes in Atlantic salmon under frozen storage[J]. Food Chemistry，2015，182：120-127.

[4] LEYGONIE C，BRITZ T J，HOFFMAN L C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat：review[J]. Meat Science，2012，91（2）：93-98.

[5] ZHU Z W，ZHOU Q Y，SUN D W. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods：a review of recent developments [J]. Trends in Food Science & Technology，2019，90：13-25.

[6] ZHU M M，ZHANG J，JIAO L X，et al. Effects of freezing methods and frozen storage on physicochemical，oxidative properties and protein denaturation of porcine *longissimus dorsi* [J]. LWT-Food Science and Technology，2022，153：112529.

[7] TENG X Y，LIU Y，CHEN L P，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.

[8] 曹蓉露，钟雅璐，蓝浩，等. 不同冷冻工艺对龙头鱼品质的影响[J]. 食品工业，2020，41（9）：5-8.
CAO R L，ZHONG Y L，LAN H，et al. Effects of different freezing methods on the quality of *Harpadon nehereus*[J]. The Food Industry，2020，41（9）：5-8.（in Chinese）

[9] WU G Y，YANG C，BRUCE H L，et al. Effects of alternating electric field during freezing and thawing on beef quality[J]. Food Chemistry，2023，419：135987.

[10] LI H Y，WANG L，WANG J X，et al. Effects of ultrasound-assisted freezing on the quality of large yellow croaker（*Pseudosciaena crocea*）subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. Food Chemistry，2023，404（Pt A）：134530

[11] SUN Q X，SUN F D，XIA X F，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.

[12] DIAO Y D，CHENG X Y，WANG L S，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，

2021，131：581-591.

[13] 杨冰，齐子修，许瑞红，等. 静磁场辅助冷冻对鲴鱼肉品质的影响[J]. 食品研究与开发，2023，44（6）：13-20.
YANG B，QI Z X，XU R H，et al. Effect of static magnetic field-assisted freezing on the quality of *Ictalurus punctatus*[J]. Food Research and Development，2023，44（6）：13-20.（in Chinese）

[14] LI D P，QIN N，ZHANG L T，et al. Degradation of adenosine triphosphate，water loss and textural changes in frozen common carp（*Cyprinus carpio*）fillets during storage at different temperatures [J]. International Journal of Refrigeration，2019，98：294-301.

[15] 赵波，应晓国，张美超，等. 贮运过程中刺身鱼水分的变化[J]. 食品与发酵工业，2021，47（22）：184-190.
ZHAO B，YING X G，ZHANG M C，et al. Study on water change of sashimi during storage and transportation [J]. Food and Fermentation Industries，2021，47（22）：184-190.（in Chinese）

[16] WEI H M，TIAN Y Y，YAMASHITA T，et al. Effects of thawing methods on the biochemical properties and microstructure of pre-rigor frozen scallop striated adductor muscle[J]. Food Chemistry，2020，319：126559.

[17] EGELANDSDAL B，ABIE S M，BJARNADOTTIR S，et al. Detectability of the degree of freeze damage in meat depends on analytic-tool selection[J]. Meat Science，2019，152：8-19.

[18] 孙光全，冯耀泽，朱明，等. 面向长途冷链下不同冷冻方式对大口黑鲈品质的影响[J]. 农业工程学报，2023，39（24）：316-326.
SUN G Q，FENG Y Z，ZHU M，et al. Effects of different freezing methods on the quality of *Micropterus salmoides* oriented to long-distance cold chain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39（24）：316-326.（in Chinese）

[19] 林国荣，曾令桢. 冷冻方式对鲍鱼品质与理化性质的影响[J]. 食品工业，2023，44（1）：182-186.
LIN G R，ZENG L Z. Effects of freezing methods on quality and physicochemical properties of abalone [J]. The Food Industry，2023，44（1）：182-186.（in Chinese）

[20] JIA G L，HE X L，NIRASAWA S，et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin [J]. Journal of Food Engineering，2017，204：18-26.

[21] 向迎春，黄佳奇，杨志坚，等. 冻结方式对凡纳滨对虾贮藏中组织冰晶及品质的影响[J]. 食品工业科技，2018，39（5）：280-287.
XIANG Y C，HUANG J Q，YANG Z J，et al. Effect of different freezing methods on the ice crystals and quality of white shrimp（*Penaeus vannamei*）in the storage[J]. Science and Technology of Food Industry，2018，39（5）：280-287.（in Chinese）

[22] MONTEIRO M L G，ROSÁRIO D K A，NETO L T，et al. Exploring high hydrostatic pressure for enhancing the preservation of white and dark muscle fish fillets stored at different packaging systems under refrigeration[J]. Food Control，2024，155：110038.

[23] 鲁珺. 液氮深冷速冻对带鱼和银鲳品质及其肌肉组织的影响[D]. 杭州：浙江大学，2015.

[24] ZHOU J Q，SUN Q X，WEI S，et al. Changes in microstructure，quality and water distribution of golden pompano（*Trachinotus ovatus*）muscles subjected to magnetic field-assisted immersion freezing during long-term frozen storage [J]. Journal of Food Engineering，2023，354：111566.

[25] LIU Y Y，ZHANG L T，GAO S，et al. Proteomic analysis of exudates in thawed fillets of bighead carp（*Hypophthalmichthys nobilis*）to understand their role in oxidation of myofibrillar proteins [J]. Food Research International，2022，151：110869.

[26] ZHANG Y M，ERTBJERG P. On the origin of thaw loss：relationship between freezing rate and protein denaturation[J]. Food Chemistry，2019，299：125104.

[27] SUN Q，KONG B，LIU S，et al. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp（*Cyprinus carpio*）and improves its muscle quality [J]. LWT-Food Science and Technology，2021，141：111080.

[28] 盖圣美，游佳伟，张雪娇，等. 利用低场核磁共振及成像技术鉴别注水肉糜[J]. 食品科学，2020，41（22）：289-294.
GAI S M，YOU J W，ZHANG X J，et al. Discrimination of water-injected ground meat using low-field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging[J]. Food Science，2020，41（22）：289-294.（in Chinese）

[29] 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.
SHI G P，GAO T Q，QIAN X Q，et al. Effects of different quick-freezing treatments on the quality changes of largemouth bass meat during frozen storage [J]. Meat Research，2020，34（12）：68-74.（in Chinese）

[30] 梅俊，许振琨，郁慧洁，等. 冷链物流中海水鱼的腐败机制及保鲜技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报，2022，41（7）：84-99.
MEI J，XU Z K，YU H J，et al. Research progress on spoilage mechanism and preservation technology of marine fish in cold chain logistics[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2022，41（7）：84-99.（in Chinese）

（责任编辑：史润东东）