

不同冻结方式下油炸牡蛎冷冻制品的品质特性比较

车桂香, 欧妍, 杨新宇, 谢霞婷, 卢思思, 刘莹, 杨子毅, 马瑞东, 刘小玲*

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 为了探究不同冷冻方式对油炸牡蛎冷冻制品品质的影响, 开发高品质、高还原度的油炸牡蛎冷冻产品, 采用冰箱冻结 (RF)、低温冰箱冻结 (SF) 及液氮浸渍冻结 (LF) 对油炸牡蛎进行冻结, 通过对复热后产品的持水性、质构、感官评价和风味等指标测定, 比较 3 种冷冻方式下的品质差异。结果显示: LF 冻结速率最快, 仅需 0.2 min 通过最大冰晶生成带, 持水性 (70.23%) 显著高于 RF (66.90%) ($P<0.05$), 产品感官评价、酥脆度和弹性最接近新鲜油炸牡蛎。3 种冻结方式的 TVB-N 值和 TBA 值均呈现显著上升的趋势 ($P<0.05$), 其中 LF、SF 和 RF 的 TBA 值分别上升 53.69%、49.75% 和 67.49%。此外, LF 与对照组在电子鼻、电子舌和 GC-IMS 的主成分分析中 PC1 距离相近, 说明其与新鲜油炸牡蛎品质更接近。SF 和 LF 则在持水性、质构、TBA 值、电子舌上效果相似, 两者均比 RF 好。综上, 相对于 RF 和 SF, LF 对油炸牡蛎品质破坏小, 与新鲜油炸牡蛎品质更接近, 更受消费者欢迎, 为油炸牡蛎的贮藏与加工提供基础数据与理论基础。

关键词: 油炸牡蛎; 冷冻方式; 液氮; 品质

文章编号: 1673-9078(2026)6-328-337

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.6.0439

Comparative Analysis of Quality Characteristics in Fried Oyster Frozen Products under Different Freezing Methods

CHE Guixiang, OU Yan, YANG Xinyu, XIE Xiating, LU Sisi, LIU Ying, YANG Ziyi, MA Ruidong, LIU Xiaoling*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The effects of different freezing methods, including refrigerator freezing (RF), snap freezing (SF), and liquid nitrogen immersion freezing (LF), on the quality of fried oyster frozen products were examined. The thawed products were evaluated for water-holding capacity, texture properties, sensory characteristics, and flavor profiles. The results indicated significant differences among the freezing methods. LF exhibited the fastest freezing rate, requiring only 0.2 min to pass the maximum ice crystal formation zone. The water-holding capacity of LF-treated samples (70.23%) was significantly higher than that of RF-treated samples (66.90%, $P<0.05$). Sensory evaluation showed that LF maintained crispness and elasticity most similar to fresh fried oysters. All freezing methods significantly increased the total volatile basic nitrogen (TVB-N) and thiobarbituric acid (TBA) ($P<0.05$). The lowest TBA increment (53.69%) was recorded in LF-treated samples, followed by those in SF- (49.75%) and RF-treated samples (67.49%). Principal component analysis of electronic nose, electronic tongue, and GC-IMS data revealed that LF-treated samples were the most closely clustered with fresh controls in PC1 space. The results demonstrated that, compared to RF and SF, LF was associated with less quality deterioration in fried oysters, with characteristics more closely resembling those of freshly fried

引文格式:

车桂香, 欧妍, 杨新宇, 等. 不同冻结方式下油炸牡蛎冷冻制品的品质特性比较[J]. 现代食品科技, 2026, 42(6): 328-337.

CHE Guixiang, OU Yan, YANG Xinyu, et al. Comparative analysis of quality characteristics in fried oyster frozen products under different freezing methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(6): 328-337.

收稿日期: 2025-03-26; 修回日期: 2025-05-15; 接受日期: 2025-05-22

基金项目: 广西大学对口支援学科建设项目 (FG2024007); 广西自然科学基金项目 (2022GXNSFBA035555)

作者简介: 车桂香 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品贮藏与加工, E-mail: 2634229360@qq.com

通讯作者: 刘小玲 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品的开发与利用, E-mail: 1106113912@qq.com

oysters, resulting in higher consumer preference. Fundamental data and a theoretical basis for the processing and storage of fried oysters were provided by this study.

Key words: fried oysters; freezing methods; liquid nitrogen; quality

牡蛎是世界第一大养殖贝类, 2023 年中国牡蛎产量达 667 万 t, 全产业链产值或超 1 500 亿元。主产区为福建、广东、山东等地, 加工以鲜销 (60%)、冷冻品为主, 深加工产品 (蚝油、蚝豉、保健品等) 占比不足 15%^[1]。牡蛎营养丰富, 其肉质细腻, 水分含量高, 组织结构易遭受到破坏^[2], 使其感官恶化、品质劣变^[3]、汁液流失等^[4,5]。油炸牡蛎是广受欢迎的菜肴^[6], 油炸牡蛎产品冻结过程以及储藏过程中容易发生品质劣变^[7], 比如颜色和口感变差, 导致保质期的缩短和资源的浪费, 需优化冷冻工艺以最大限度保留牡蛎的营养成分和独特鲜味, 提高冷冻品质。

冷冻方式和速率直接影响食品品质^[8,9], 是影响其品质还原度的关键因素^[10]。快速冷冻能形成细小均匀的冰晶, 减少对细胞和蛋白质结构的破坏。液氮冻结作为快速冷冻方式, 可减小冰晶尺寸, 降低解冻水分损失, 保持食品风味和品质。研究表明, 快速冷冻比慢速冷冻更能维持食材质地和微观结构^[11]。慢速冷冻易产生大而不规则胞外冰晶, 导致肌纤维断裂和保水性下降^[12]。Phinney 等^[13]采用常规冷冻、高速冷冻和快速冷冻来冷冻马铃薯片, 发现快速冷冻更好地保持了马铃薯的质地和微观结构。改变冻结方式或冻结速率能够在一定程度上抑制蛋白质和脂质氧化等劣变现象^[14]。目前关于不同冷冻方式对油炸牡蛎品质影响的研究尚未见报道, 探索最佳冷冻工艺对提升牡蛎加工品质具有重要意义。

因此, 本研究以油炸牡蛎为研究对象, 探究传统冰箱冻结 (Refrigerator Freezing, RF) $-18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、低温冰箱冻结 (Snap Freezing, SF) $-80\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和液氮浸渍冻结 (Liquid Nitrogen immersion Freezing, LF) $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三种不同冻结方式对油炸牡蛎持水性、质构、风味等品质的影响, 为研究优化油炸牡蛎冻结工艺提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牡蛎 (不带壳, $18\pm 3\text{ g/只}$) 购于广西南宁海鲜交易市场; 食品级包装袋购于拼多多电商平台; 红薯淀粉、豌豆淀粉、小麦面粉、辣椒粉、白胡椒粉、食盐、白砂糖、金龙鱼调和油等均购于广西南宁明秀沃尔玛超市。

TBA 溶液、三氯乙酸、氯仿、碳酸钙、氯化钾、酒石酸、无水乙醇、氢氧化钾、氯化银、硼酸等, 以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器

SQP 型电子天平, 德国 Sartorius 公司; EF-12L 油炸锅, 广州拓奇厨房设备有限公司; BCD-279 直冷式冷藏冷冻箱, 博西华家用电器有限公司; FORMA906 超低温冰箱, 赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司; 多功能酶标仪, 奥地利 TECAN 公司; TECA K984 凯氏定氮仪, 山东海能科技仪器有限公司; CR21N 高速冷冻离心机, 日立公司; TMS-PRO 质构仪, 美国 FTC 公司; PEN3 便携式电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; Taste Sensing System SA-402 味觉分析系统, 日本 INSENT 智能传感器有限公司; Flavour Spec® 风味分析仪, 德国 G.A.S 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 油炸牡蛎的制作

油炸牡蛎工艺流程如图 1 所示:

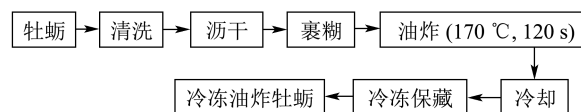


图 1 油炸牡蛎冷冻制品工艺流程

Fig.1 Process flow of fried oyster frozen product

裹糊配方: 根据牡蛎重量计, 红薯淀粉 27.6%、豌豆淀粉 18.4%、水 46%、面粉 4%、辣椒粉 1.5%、食盐 1.5%、白胡椒粉 0.5%、白砂糖 0.7%, 混匀后备用。

操作流程: 预先用水将按参考用量的粉料调整为粘稠糊状料, 将沥干的牡蛎放到糊料中均匀裹满牡蛎, 然后置于 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 油温的调和油中油炸 2 min, 冷却, 然后将冷却的油炸牡蛎置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中贮藏。

1.3.2 冻结方式实验设计

将试验样品置于传统冰箱冻结 (RF, $-18\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低温冰箱 (SF, $-80\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和液氮浸渍 (LF, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), 冻结至中心温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 用聚乙烯食品袋包装并密封, 将贮藏于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中, 贮藏 7 d 后测定。将不同冷冻后的样品取出解冻 12 h 后, 复热油炸 ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 90 s) 后测定指标, 并与新鲜油炸牡蛎 (对照组, CK) 品质特性作比较。

1.3.3 冻结曲线测定

将温度测量仪探头插入样品的中心位置并固定，用温度监测仪记录温度变化，直至样品温度降至-18℃以下。绘制冻结曲线，采用公式（1）计算冻结曲线。

$$V = \frac{\delta_0}{t_0}$$

式中：

V ——冻结速率， $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ ；
 δ_0 ——物体表面与中心间的最短距离， cm ；
 t_0 ——物体表面达到0℃后到中心温度达初始冻结点以下所需要的时间， h 。

1.3.4 持水性（WHC）测定

持水性参照Tsai等^[15]的方法稍作修改。将油炸牡蛎去壳后用滤纸吸干后均匀切成小段，每段重约3g（ W_1 ），随后用滤纸将样品包裹并离心10min（ $4\,000\,\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，4℃），再次称重（ W_2 ），持水性按公式（2）计算。

$$H = \frac{W_2}{W_1} \times 100\%$$

式中：

H ——持水性（WHC），%；
 W_1 ——离心前牡蛎样品质量，g；
 W_2 ——离心后牡蛎样品质量，g。

1.3.5 质构测定

质构特性测定参考王萍等^[16]的方法，稍作修改。采用质构仪，选取的探头为100N，测定条件为：形变百分量50%，检测速度 $1\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，起始力0.5N。测定以及分析参数包括酥脆度、弹性、咀嚼性，重复测定6次。

1.3.6 感官评价

由10名经过专业培训的感官评定员（男女各5名）组成的评价小组，对油炸牡蛎的感官品质进行综合评价。评价指标包括色泽、口感、滋味、组织形态和喜好度五个维度，参考感官评价表1。

1.3.7 挥发性盐基氮（TVB-N）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》执行。

1.3.8 硫代巴比妥酸（TBA）值测定

参照GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》执行，并用公式（3）计算。

$$T = \frac{A_{532} - A_{600}}{M} \times \frac{1}{m} \times Mr \times 100$$

式中：

T ——TBARS；
 A_{532} ——样品在532nm波长处的吸光度；

A_{600} ——样品在600nm波长处的吸光度；
 M ——丙二醛的摩尔吸光系数，155；
 Mr ——丙二醛的相对分子质量，72.06；
 M ——样品质量，g。

表 1 油炸牡蛎冷冻制品感官评价表
Table 1 Sensory evaluation table of fried oyster frozen products

评价指标	评分标准	分值
色泽	颜色鲜亮，呈现金黄色	8~10
	颜色呈现黄色	5~7
	颜色暗淡，不均匀	1~4
口感	口感酥脆，鲜嫩多汁	8~10
	口感一般	5~7
	口感差，牡蛎较韧	1~4
滋味	味道鲜美，无异味	8~10
	味道一般，无异味	5~7
	味道差，有异味	1~4
组织形态	组织完整，形态美观	8~10
	组织基本完整，形态一般	5~7
	组织破碎，外观形态较差	1~4
喜好度	非常喜欢	8~10
	一般喜欢	5~7
	不喜欢	1~4

1.3.9 电子鼻的测定

参考王伟静等^[17]方法，准确称取3.0g样品于40mL顶空瓶中，密封后室温平衡30min。采用手动顶空进样，载气为活性炭过滤后的干燥空气（ $350\,\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ）；测量时间与清洗时间均为120s，每种样品重复测定3次。

1.3.10 电子舌的测定

参考余远江^[18]的方法。取20g样品，按1:10（ m/V ）加入蒸馏水，煮沸3min，混匀后于8℃、 $5\,000\,\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心20min，取上清液过滤，室温下进行电子舌检测。

1.3.11 GC-IMS的测定

参考余远江^[18]的方法。准确称取2.0g样品放入20mL顶空瓶，密封后于45℃， $500\,\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡器孵化10min，在80℃顶空进样（0.5mL， N_2 载气），采用GC-IMS结合LAV软件和Library Search对挥发性风味物质定性分析、二维图谱及PCA等分析。

1.3.12 数据处理

采用Office 2021软件进行数据分析，用SPSS 26.0版软件进行邓肯氏单因素显著性差异分析，并用Origin 2025软件绘图。每组实验3次平行，用平均数±标准方差表示。

2 结果与分析

2.1 不同冻结下的冻结曲线

食品在最大冰晶生成带通过的时间长短决定着其冻结速率的快慢，冻结过程中形成冰晶的大小和分布的均匀性对食品内部细胞、组织和蛋白质等结构有影响^[19]。不同冻结方式下的油炸牡蛎冻结曲线及参数分别见图2和表2。结果表明，三种冻结方式中，RF、SF通过最大冰晶生成带（0~-5℃）所需时间分别为259、22 min，LF通过最大冰晶生成带所用时间最短，仅需0.2 min。最大冰晶生成带的阶段对冷冻样品品质影响重大，通过该阶段时间越短，形成冰晶越小且分布均匀，品质越好。相比于RF和SF，LF冻结速率快，其曲线下降斜率大，LF冷冻采用液氮制冷剂，液体比空气具有更高的传热系数，提高了冻结速率^[20]，这说明较低的冻结温度能显著提高冻结速率。

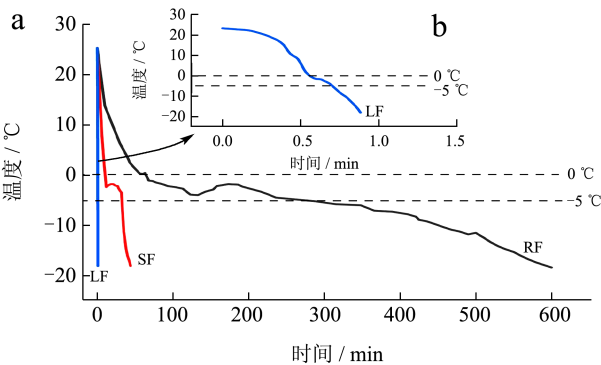


图2 不同冷冻方式下牡蛎样品的温度变化曲线
Fig.2 Temperature variation curves of oyster samples under different freezing methods (n=3)

注：a 为不同冻结方式下油炸牡蛎的冻结曲线；b 为 LF 冻结下油炸牡蛎的冻结曲线。

表2 不同冻结方式下油炸牡蛎最大冰晶生成带时间及冻结速率
Table 2 Maximum ice crystal formation time and freezing rate of fried oysters under different freezing methods

组别	最大冰晶生成带时间/min	冻结速率/(cm·h ⁻¹)
RF	259	0.23
SF	22	2.73
LF	0.2	270.00

梁淇雅等^[8]对比了不同冻结方式对青椒肉丝预制菜肴品质的影响，结果表明，液氮浸渍冻结时间最短，通过最大冰晶带时间短，冻结速率最快，可达31.58 cm·h⁻¹。崔立业等^[9]对不同冻结方式对土豆烧牛肉菜肴品质进行研究，其结果表明相比于空气冷冻，浸渍冷冻缩短了土豆烧牛肉菜肴的总冻结时间，

其中浸渍冷冻（-38℃）的总冻结时间较空气冻结（-18℃）的牛肉和土豆分别缩短了96.02%、97.34%，缩短了菜肴通过最大冰晶生成带的时间，能更好地提高菜肴的冻结速率。很多研究表明，在不同冻结方式中，冻结速率越高，解冻损失率越低，样品保水性和组织结构保持较好，且可以减少反复冻融引起的品质下降^[21-24]，更接近新鲜品质。

2.2 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品持水性和质构特性的影响

持水性是肉类保持水分的能力，冻藏过程中冰晶的升华与重结晶会导致持水性的下降^[25]。从表3中可看出，与对照组（CK）相比，经冻结处理后油炸牡蛎样品的持水性均显著下降（ $P<0.05$ ），其中RF的下降幅度较大（10.25%）。RF处理后的样品持水性降低，主要是由于在缓慢冷冻过程中形成大冰晶，严重破坏了细胞结构，导致部分结合水转化为游离水，导致离心过程中细胞间基质和细胞的水分大量流失^[26]。LF（70.23%）和SF（69.41%）的持水性高于RF（66.90%）（ $P<0.05$ ），表明冻结速率较快的LF和SF相对于传统冻结方式能够一定程度上能维持油炸牡蛎样品的持水性，这可能是由于快速冻结形成的较小冰晶对肌纤维造成较弱的机械损伤，使肌纤维间容纳更多水分^[27]。赵建生等^[12]对比了不同冻结方式对猪肉炖煮品质的影响，结果发现表明超声辅助浸渍冻结相对于传统冻结方式能够一定程度维持炖煮后样品的水分含量（57.81%），更接近对照组58.75%。因此，冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品的持水性有较大的影响，RF和LF冻结可显著减缓牡蛎水分的损失。

表3 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品持水性和质构特性的影响

Table 3 Effects of different freezing methods on water holding capacity and texture characteristics of fried oyster frozen products

组别	持水性/%	酥脆度/N	弹性/mm	咀嚼性/mj
CK	75.54 ± 1.44 ^a	22.59 ± 3.64 ^a	7.14 ± 1.05 ^a	41.05 ± 15.72 ^a
RF	66.90 ± 1.13 ^c	18.35 ± 1.69 ^a	5.73 ± 0.50 ^b	53.84 ± 11.48 ^a
SF	69.41 ± 1.76 ^b	18.97 ± 3.80 ^a	6.29 ± 0.63 ^{ab}	46.10 ± 5.18 ^a
LF	70.23 ± 1.21 ^b	20.05 ± 2.98 ^a	6.34 ± 0.54 ^{ab}	43.69 ± 12.89 ^a

注：同一列右肩不同的小写字母表示具有显著性差异（ $P<0.05$ ）。

此外，冷冻食品的质地特征对消费者的接受程度同样起着重要的作用。从表3中可看出，随着冻结速率的增加，冻结后复热的油炸牡蛎冷冻制品的酥脆度和弹性越来越接近对照组。相比之下，各组的酥脆度和咀嚼性没有显著性差异（ $P\geq 0.05$ ），但在弹性方面RF

与 CK 存在显著性差异 ($P < 0.05$), LF、SF 与 CK 没有显著性差异 ($P \geq 0.05$)。由于 SF、LF 冷冻显著缩短了通过最大冰晶带的时间,形成的冰晶尺寸更小且分布更均匀,从而有效保护了肌肉组织的完整性,使牡蛎解冻复热后更加接近对照组的品质,较好的保持油炸牡蛎的弹性口感。

2.3 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品感官品质的影响

根据资料显示,冷冻速度越快,产品通过最大冰晶生成区的时间越短,冰晶对肌肉组织的损伤越小,在长期储存期间能更好地保持样品的质量,解冻复热后样品会更接近新鲜状态^[10,28]。不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品感官品质的影响如图 3 所示。新鲜油炸的油炸牡蛎具有独特油炸味道,牡蛎鲜嫩多汁,口感鲜美,形态完整无损伤。从感官评价雷达图可以看出,经过冷冻处理后的油炸牡蛎在感官上 RF、SF、LF 的可接受度依次升高,LF 方式冻结的油炸牡蛎感官评价喜好度更高,产品口感更接近于对照组。由于液氮的冻结速度快,形成的冰晶体积小,在口感和气味等方面仍然优于其他组。付彩霞等^[29]对比了不同冻结方式对鱼香藕丸品质的影响,结果表明:与新鲜鱼香藕丸相比,冰箱冻结的鱼香藕丸综合感官品质稍差,鼓风冻结和液氮喷淋冻结更能保持鱼香藕丸的感官品质。

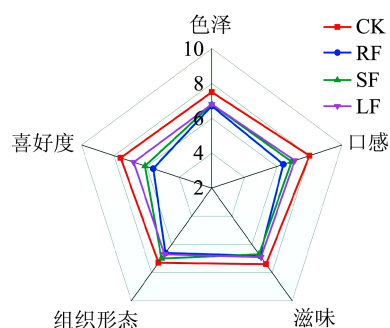


图 3 油炸牡蛎冷冻制品感官评价雷达图

Fig.3 Radar chart of sensory evaluation of fried oyster frozen products

2.4 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品 TVB-N 值和 TBA 值的影响

挥发性盐基氮 (TVB-N) 是水产品新鲜度评价的关键指标之一^[30],与蛋白质和胺降解产生有关。由图 4a 可知,新鲜油炸牡蛎的 TVB-N 含量为 2.05 mg/100 g,冻结处理组的 TVB-N 值均呈现出显著上升的趋势 ($P < 0.05$),其中 RF 冻结下的油炸牡蛎 TVB-N 含量最高,LF 冻结处理下的牡蛎上升趋势较为缓慢。Lv 等^[21]的研究表明液氮冷冻和鼓风冷冻可以

通过减少冰晶对蛋白质的机械损伤来防止肌球蛋白重链变性,更好地保持墨鱼的新鲜度。贮藏一周后,RF 的 TNB-N 值上升较快可能是冻结速度较慢,生成了较大冰晶,破坏了肌肉组织蛋白,导致汁液流失较多,加速了油炸牡蛎的蛋白质氧化。与其他冷冻方法相比,LF 冻结能减少 TVB-N 含量的增加,延缓了油炸牡蛎的腐败。

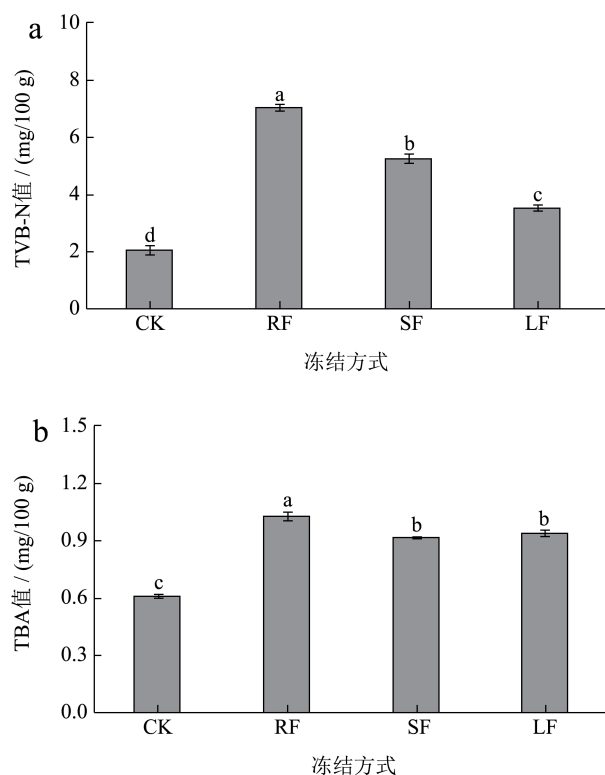


图 4 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品 TVB-N 值和 TBA 值的影响

Fig.4 Effects of different freezing methods on TVB-N value and TBA value of fried oyster frozen products

注: 同一列右肩不同的小写字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

尽管在冷冻储存过程中酶活性和微生物生长会降低,但肌肉组织中仍然存在脂质氧化反应,这可能会影响肉的品质,包括风味、质地、营养和颜色^[31]。水产品冷冻过程中由于冰晶的作用会破坏水产品原有的细胞膜结构,导致细胞内释放出非血红素铁离子、氧化酶、超氧自由基转化为羟基自由基,进一步促进脂肪的氧化,得到降解产物醛、酮等,因此脂肪的氧化程度越大,生成的丙二醛含量越高,对产品品质产生负面影响^[32]。

图 4b 显示了不同冻结方式下油炸牡蛎冷冻制品 TBA 值的变化,对照组油炸牡蛎的丙二醛含量为 0.6 mg/100 g,处理组的牡蛎丙二醛含量均呈现显

著上升的趋势 ($P<0.05$), 其中 LF、SF 和 RF 分别上升了 53.69%、49.75% 和 67.49%。对比三种冷冻方式, LF、SF 处理的油炸牡蛎氧化程度比 RF 低。根据资料表明, 冻结速率会影响冷冻肉中冰晶的位置和形态^[33]。在极快的冻结中, 小冰晶主要在细胞内形成, 而缓慢的冻结速率主要产生细胞外冰晶。在这两种情况下, 冰晶对肌肉细胞肌膜的物理损伤预计低于慢速的冷冻^[34]。Hou 等^[35]探究不同冷冻方式对猪肉冷冻贮藏期间品质变化, 结果表明冷冻方式、贮藏时间及其交互作用均对猪肉脂质氧化有显著影响 ($P<0.05$), 在猪肉的冷冻储存过程中, 水主要以冰晶的形式存在, 这阻止了肉类受到水膜的保护, 随着水的升华, 空气可以充满肌肉细胞空间, 从而导致脂质氧化。

综上, RF 组的 TVB-N 值和 TBA 值均显著高于对照组 ($P<0.05$), 表明常规冰箱冻结对牡蛎品质劣变影响较大。虽然 SF 和 LF 的 TBA 值无显著差异, 但 LF 的 TVB-N 值显著低于 SF ($P<0.05$), 说明 LF 比 SF 更能效抑制牡蛎品质劣化, 产品的品质保持越好。

2.5 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品电子鼻结果分析

电子鼻是高效、快速、无损和环境友好的技术手段, 常用于快速鉴别和区分样品间的气味差异。通过绘制雷达图构建不同样品的气味轮廓。由图 5a 可知, 雷达图形状发生了较明显的改变, 与其他各组相比, 各组传感器 W5S (对氮氧化合物敏感)、W1S (对烷烃敏感)、W1W (对无机硫化物敏感)、W2S (对醇类、醛酮类敏感) 和 W2W (对芳香成分、有机硫化物敏感) 响应值逐渐增大, 说明处理组与对照组之间的挥发性成分物质产生了明显变化。

油炸牡蛎冷冻制品在 W5S 传感器上的氮氧化合物响应值呈逐步上升的趋势, 含硫化合物主要来源于蛋白质分解产生, 对应 TVB-N 值分析结果。其次, 在 W1S 传感器上的响应值也呈逐步上升的趋势, 可能是烷基自由基的脂质氧化引起的, 但由于烷烃类阈值较高, 所以对整体风味贡献不大。水产品中硫胺素受热降解后生成的杂环化合物及含硫化合物等对产品风味有一定的影响, 挥发性硫化物 (如硫化氢) 具有腐烂等不良风味^[36]。处理组与对照组在 W2S 传感器的响应值有所增加, 牡蛎含有的不饱和脂肪酸氧化降解和氨基酸降解, 也会导致醛酮类物质增加。在冷冻过程中冰晶的生成破坏细胞结构, 加速了醛、酮、酯和其他挥发性化合物的形成^[37]。

为进一步分析不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品的香气成分差异, 利用电子鼻软件绘制主成分分析

图, 如图 5b 所示, 不同圆圈代表不同冻结方式处理后油炸牡蛎的挥发性风味物质信号采集点, 距离远近表示不同样品间气味差异大小, 距离越大, 表示样品间差异越大。牡蛎样品的 PC1 和 PC2 的贡献率分别为 91.72% 和 5.55%, 累计贡献率达 97.27%, 说明这两个 PC 能反映牡蛎样品主要香气成分的特征信息。不同冻结方式的油炸牡蛎冷冻制品挥发性物质组成存在差异, RF 总体气味分布与 CK 差异最大。不同样品在横轴上排列顺序依次为 RF、SF、CK 和 LF, 表明 LF 处理对牡蛎样品风味有一定改善作用。

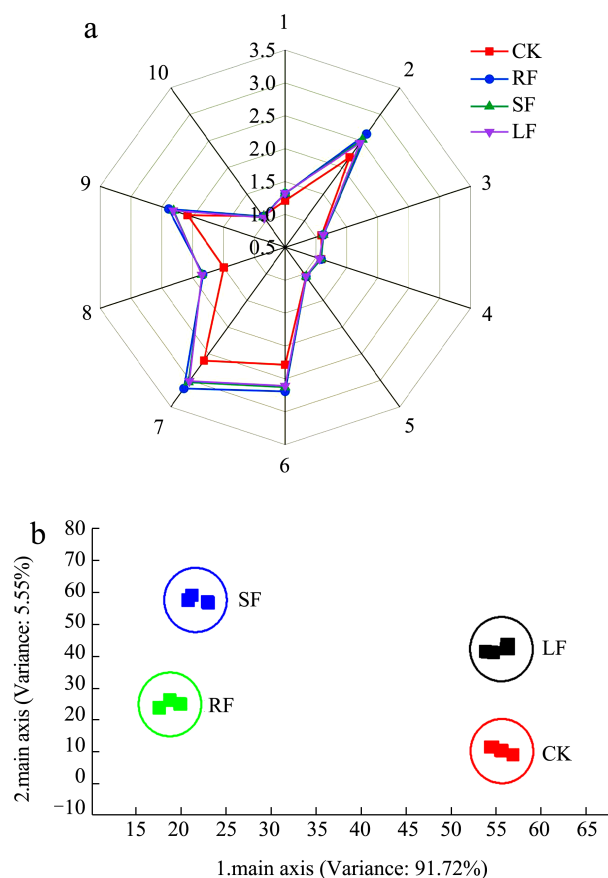


图 5 不同冻结方式下的油炸牡蛎冷冻制品风味雷达图和 PCA 图

Fig.5 Flavor radar map and PCA map of fried oyster frozen products under different freezing methods

2.6 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品电子舌结果分析

电子舌是用来模拟人类味觉系统的技术, 可以分析出不同样品间滋味的差异。不同冻结方式下的油炸牡蛎冷冻制品电子舌的主成分分析如图 6 所示。从图 6a 中可知, 油炸牡蛎的滋味可总结为鲜味突出, 微咸味和甜味, 有轻微苦涩味, 并伴有一定苦味回味。在酸味、回味 B、鲜味、丰富中三个处理组的特征值

低于对照组，这可能是由于冷冻对相应滋味破坏较大。其中，SF 的苦味、涩味与 CK 接近，LF 中的酸味、鲜味和咸味与 CK 接近，说明这两中冻结方式对酸味、鲜味、咸味、苦味和涩味滋味的改善有作用，对其他滋味的改善作用不明显。

从图 6b 中可以看出 PC1 方差贡献率为 47.5%，PC2 方差贡献率为 32.6%，累计方差贡献率可达到 80.1%，说明该主成分分析图可以用于表达样品整体的味道特征。样品坐标轴间差异越大，代表其滋味相差越大。在 PC1 方向上，RF 样品与 CK 样品相距较远，LF 样品与 CK 样品相距较近。PC2 方向上，LF、SF 和 RF 与 CK 相差不大。综上，不同冻结方式处理后的样品均与对照组存在差异，SF 和 LF 均能减小油炸牡蛎冷冻制品酸味、鲜味、咸味、苦味和涩味的变化。

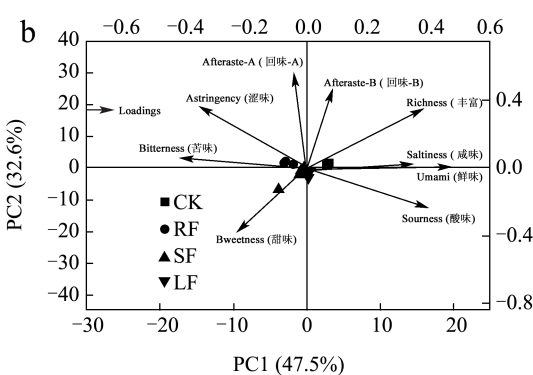
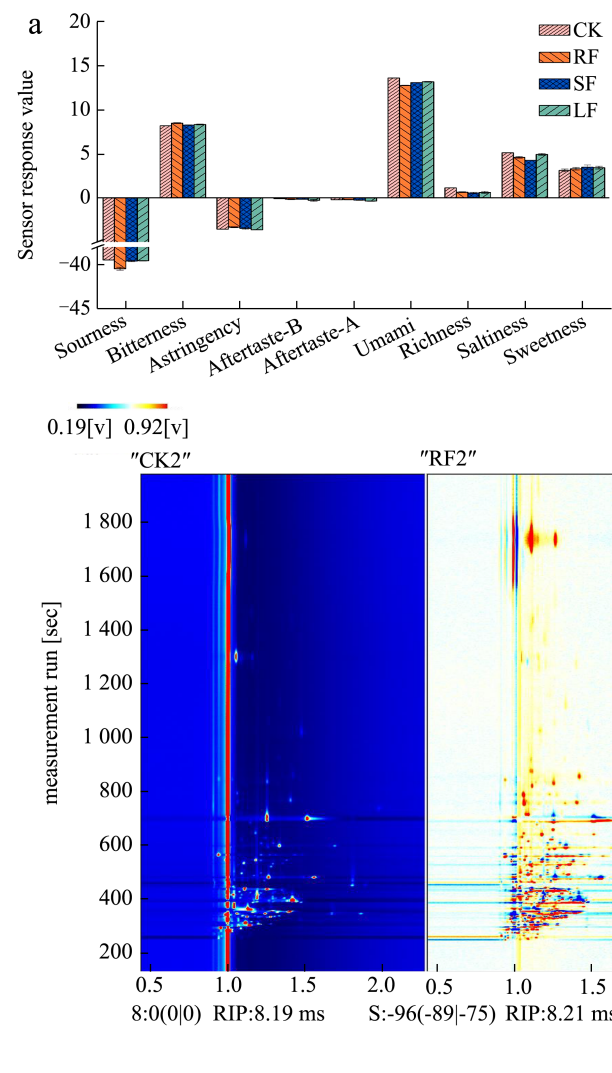


图 6 不同冻结方式下的油炸牡蛎冷冻制品的电子舌传感器
味觉强度值 (a) 和主成分图 (b)

Fig.6 Electronic tongue sensor taste intensity value (a) and
principal component diagram (b) of fried oyster frozen
products under different freezing methods

2.7 不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品风味差异性分析

为进一步探寻不同冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品风味特征的影响，利用 GC-IMS 分析检测。通过 GC-IMS 对油炸牡蛎的挥发性物质进行解析，得到图 7。图中蓝色和红色区域分别表示化合物含量低于和高于对照样。由图中可以看出，样品的挥发性组分峰信号出现的保留时间为 0~1 800 s，漂移时间为 0~2 s。

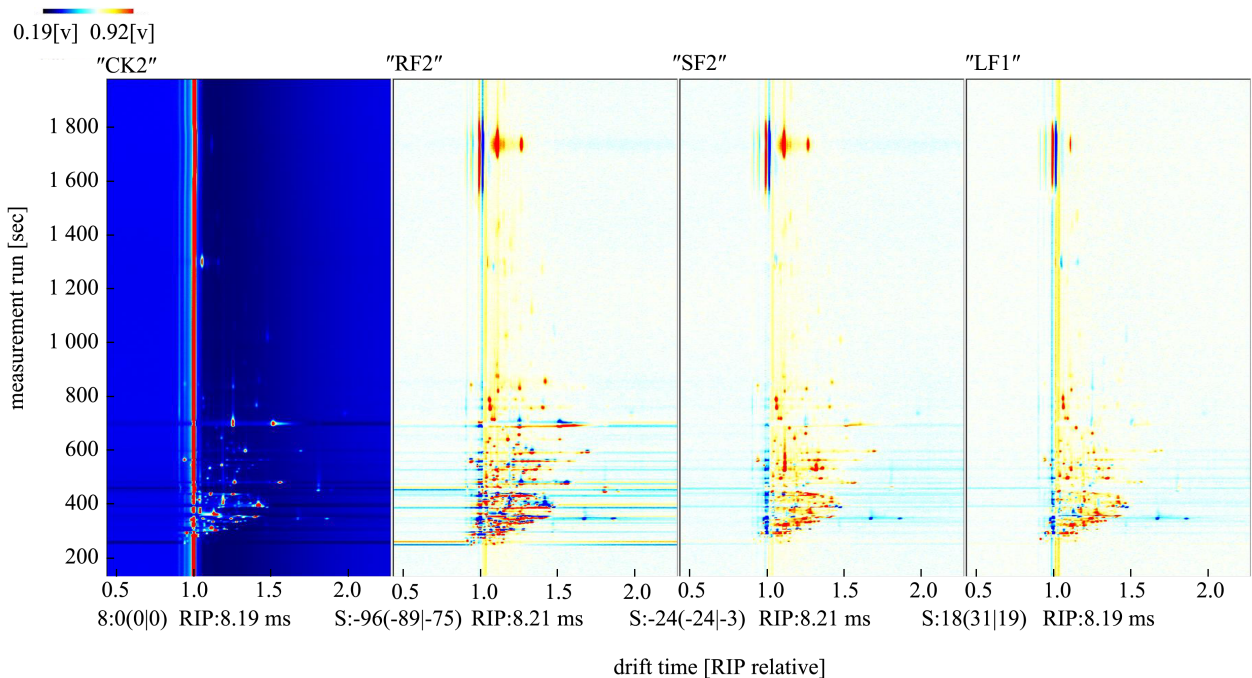


图 7 不同冻结方式下的油炸牡蛎冷冻制品的 GC-IMS 差异对比图

Fig.7 GC-IMS difference comparison diagram of fried oyster frozen products under different freezing methods

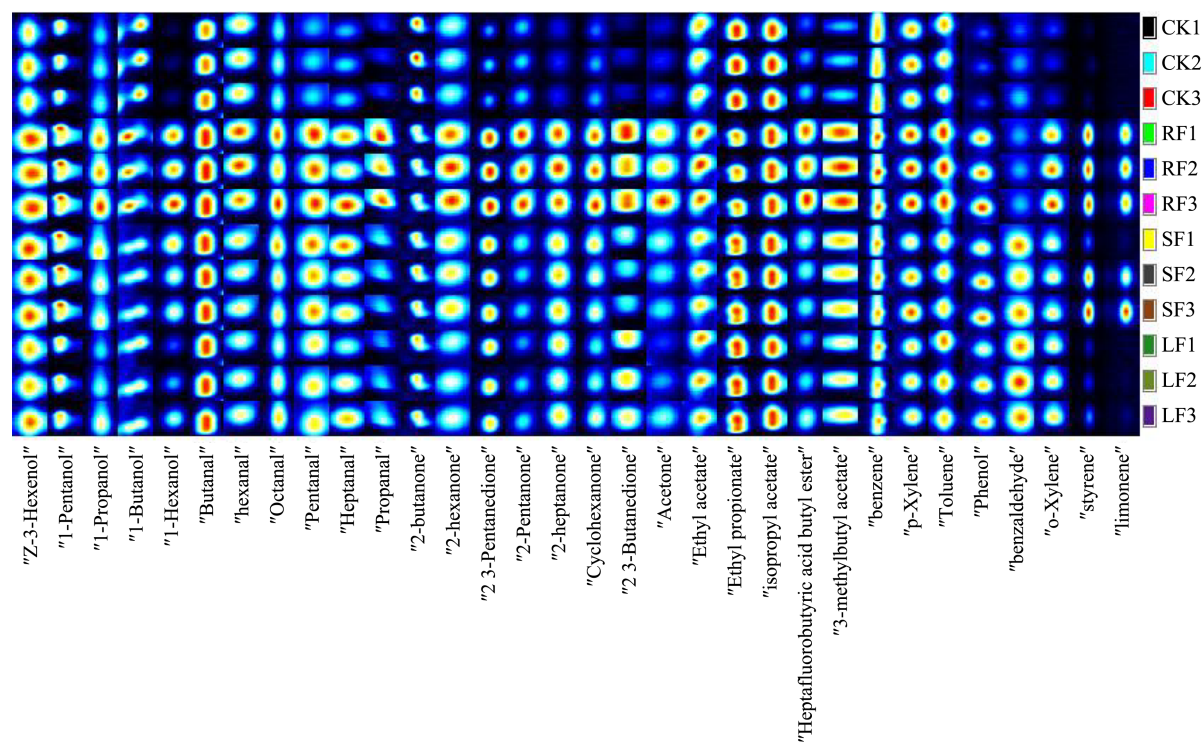


图 8 不同冻结方式下的油炸牡蛎冷冻制品挥发性成分的指纹图谱

Fig.8 Fingerprints of volatile components of fried oyster frozen products under different freezing methods

采用 LAV 软件自带的 Gallery Plot 插件生成可视化指纹图谱，通过其具体化合物浓度含量信息，可以进一步看出冻结方式对油炸牡蛎挥发性化合物的影响和差异，如图 8 所示。由图 8 可知，油炸牡蛎共检出 32 种化合物（单体或二聚体），包含：醛类 7 种，醇类 5 种，酮类 8 种，酯类 5 种，烯类 2 种，杂环类 5 种。

从指纹图中观察到，(Z)-3-己烯醇、正戊醇、丁醛、己醛、2-丁酮、乙酸乙酯、乙酸异丙酯、丙酸乙酯、1-丙醇、2-丁酮、在四个组别中均含有相似的挥发性化合物，其中大多数是醇类、醛类和酯类。此外，正丙醇、正丁醇、己醇、己醛、辛醛、戊醛、丙醛、2-己酮、丙酮、2-庚酮、2,3-戊二酮、2-戊酮、庚醛等在 RF 中更丰富，在其他组中则较少。尤其是己醇、丙醛、2-戊酮、丙酮等在 RF 比其他两个处理的含量更高。相比较 SF 和 LF 发现，除了 (Z)-3-己烯醇、戊醛、庚醛、2-庚酮的含量 SF 比 LF 多，其他物质含量相似。在 RF 冷冻下油炸牡蛎冷冻制品形成了大而不规则的冰晶，破坏了肌肉细胞结构，导致氧化风味物质增多。LF 速冻速率更快可以形成更小的冰晶，在贮藏过程中的水分流失较少，进一步减缓蛋白质和脂质的降解，减缓了不良风味物质（醛、酮类等）的产生。Kawabe 等^[38]发现，牡蛎在储存过程中会产生 2-戊醇、1-戊醇、己醛和其他化合物，这些化合物可能来自脂氧合酶对多不饱和脂肪酸的氧化降解。

醇类是脂质氧化产生的次级代谢产物，主要由多不饱和脂肪酸氧化产生。在测定样品中，(Z)-3-己烯醇具有青草香气或绿叶气味。牡蛎在高温油炸时，多不饱和脂肪酸（如 ω -3 脂肪酸）氧化裂解，生成饱和醇（如己醇、戊醇）。此外在冷冻贮藏过程会进一步促进脂质氧化分解，产生一些醇类和小分子化合物。饱和醇（如己醇）大量生成，进一步加重氧化味、金属味，掩盖牡蛎的鲜味。

醛类物质含量的变化能够较好地反映在冻藏过程中的脂质氧化程度^[39]。醛类化合物是影响牡蛎风味品质的关键因素，这主要归因于其极低的风味阈值^[40]。研究表明，这类物质主要通过两种途径形成：一是氨基酸的 Strecker 降解反应，二是不饱和脂肪酸的氧化分解过程^[41]，大多数醛类具有油味和坚果香气^[42]。己醛、庚醛和戊醛带来不愉悦的氧化腥味和腐臭感（RF 含量较多），可能是由油酸和亚麻酸氧化分解产生^[43]，容易破坏牡蛎的细腻风味。

酮类由不饱和脂肪酸氧化和氨基酸降解产生，主要表现为油脂味、青草味、泥土味^[44]。酮类在酶的作用下先生成一系列短链的饱和醛和不饱和醛，而后脂肪酸又进一步被分解成醇、酮、酸等物质，形成强烈的哈喇味^[45]，从而导致风味劣变。在油炸牡蛎冷冻制品共检测出酮类 8 种，大多数酮类物质在 RF 中更丰富，在其他组中则较少，说明 RF 处理下的油炸牡蛎风味

劣变更加严重。

总体而言，不同冻结方式对牡蛎内某些挥发性风味化合物的形成产生变化，RF 处理产生了更高的醛、酮等不良的气味。这可能是由于高温、蛋白质变性、脂质氧化和美拉德反应的结合。相对于 LF 处理则延缓不良风味物质的产生，有利于保持油炸牡蛎原有的风味。

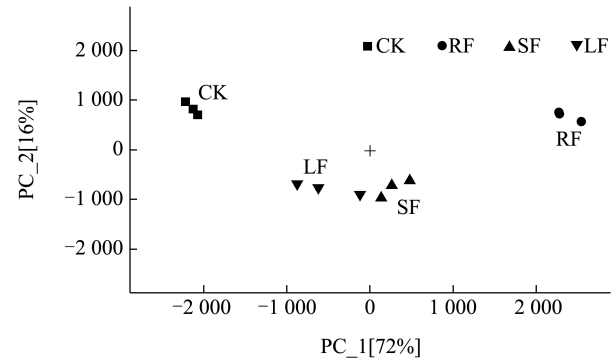


图 9 不同冻结方式下的油炸牡蛎冷冻制品挥发性成分 PCA 图

Fig.9 PCA diagram of volatile components in fried oyster frozen products under different freezing methods

通过主成分分析能够更直观看出不同冻结方式对油炸牡蛎的风味物质差异，使用 LAV 软件中的 PCA 插件进行主成分分析绘图，如图 9。PC1（72%）与 PC2（16%）的累计贡献度为 88%，说明分析结果可靠，能够反应不同样品之间的差异。在 PCA 分析图中，各样品间的距离越近表示差异性越小，距离越远则表示差异性越大。LF 与 SF 在 PC1 的距离相近，说明两种冻结方式下的油炸牡蛎制品的挥发性化合物具有定的相似性，但含量存在差异导致出现不同的风味特征。其次，LF 较其他组更接近于 CK，说明冷冻速率越快，冰晶的形成对油炸牡蛎的风味破坏越小，产品的品质保持越好。

3 结论

本研究对比了 RF、SF 和 LF3 种冻结方式对油炸牡蛎冷冻制品的影响。结果表明，LF 冷冻速率最快，能显著缩短样品通过最大冰晶生成带的时间，减少冰晶对组织结构的破坏，从而更好地保持产品品质。

在持水性、质构特性、脂质氧化（TBA 值）和电子舌滋味分析等指标上，LF 和 SF 表现相近，均优于 RF 组。LF 在挥发性盐基氮（TVB-N）、感官评分、电子鼻及挥发性风味物质等关键指标上更接近新鲜油炸牡蛎，说明 LF 能有效延缓氧化并维持风味稳定性。其中，电子舌表明油炸牡蛎滋味以鲜味为主，带有微咸、微甜及轻微苦涩味。GC-IMS 共检测出 32 种挥发性成分，包括醛类（7 种）、醇类（5 种）、酮类（8 种）、

酯类（5 种）、烯类（2 种）和杂环类（5 种），RF 组中己醇、丙醛等风味物质含量较高，表明其风味劣变更严重。主成分分析显示，LF 和 SF 组的挥发性成分较为相似，且 LF 组最接近新鲜对照，进一步证明液氮冷冻能最大程度保留牡蛎原有风味。

综上，液氮冷冻技术在提高持水性、延缓氧化劣变及保持风味品质方面具有显著优势，是油炸牡蛎冷冻贮藏的高效加工方法，可为油炸牡蛎的贮藏提供基础数据基础。

参考文献

[1] 农业农村部渔业渔政管理局等.2024中国渔业统计年鉴[M].北京:中国农业出版社,2024.

[2] 陈海强,梁钻好,梁风雪,等.不同冻结方式对牡蛎品质的影响[J].食品工业科技,2019,40(7):243-247.

[3] WANG B, DOU X, LIU K, et al. Intelligent evaluation and dynamic prediction of oyster freshness with electronic nose based on the distribution of volatile compounds using GC-MS analysis [J]. Foods, 2024, 13(19): 3110.

[4] 李采琴,马超,高加龙,等.温度波动对模拟冷链过程牡蛎肉鲜度品质和微生物生长的影响[J].广东海洋大学学报,2024,44(5):96-104.

[5] TANTRATIAN S, KAEPHEN K. Shelf-life of shucked oyster in epigallocatechin-3-gallate with slightly acidic electrolyzed water washing under refrigeration temperature [J]. LWT, 2020, 118(1): 108733.

[6] 陈美花,潘佳丽,翁文治.油炸温度和时间对外裹糊牡蛎品质的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(12):124-129.

[7] 陈美花,邵婷燕,韦晓兰,等.油炸裹糊牡蛎贮藏品质的变化与货架期预测[J].食品工业科技,2021,42(8):288-294.

[8] 梁洪雅,黄忠民,苏艺萌,等.不同冻结方式对青椒肉丝预制菜肴品质特性的影响[J].食品工业科技,2025,46(19):150-157.

[9] 崔立业,林珩迅,胡小佳,等.不同冻结方式对土豆烧牛肉菜肴品质的影响[J].食品科学,2024,45(20):232-238.

[10] 胡京超,刘慈坤,刘晏玮,等.不同冷冻方式对预制油爆大虾品质还原度的影响[C]//中国食品科学技术学会.中国食品科学技术学会第二十一届年会论文摘要集.渤海大学食品科学与工程学院国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心,2024:453.

[11] 于丽霞.冻结方式和冻藏条件对罗氏沼虾品质的影响研究[D].无锡:江南大学,2018.

[12] 赵建生,程宇轩,马旭阳,等.不同冻结方式对猪肉炖煮品质的影响[J].肉类研究,2024,38(3):64-69.

[13] PHINNEY D M, FRELKA J C, WICKRAMASINGHE A, et al. Effect of freezing rate and microwave thawing on texture and microstructural properties of potato (*Solanum tuberosum*) [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(4): 933-938.

[14] SUN X, LIU W, XIAO H, et al. Effects of different freezing methods on the damage in potato tissues impregnated with trehalose [J]. LWT, 2024, 213(12): 117096.

[15] TSAI H, HSIAO Y, WENG Y. Effects of individual and block freezing on the quality of pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during storage

- under different pretreatment conditions [J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9404.
- [16] 王萍,张健,孙利芹,等.油炸工艺对南极冰鱼香酥鱼块品质的影响[J].食品工业,2020,41(9):122-127.
- [17] 王伟静,张松山,谢鹏,等.电子鼻和电子舌快速检测炖制下牛肉的品质[J].食品研究与开发,2017,38(17):124-128.
- [18] 余远江.五种广西优势水产原料及其油炸制品的风味特征研究[D].南宁:广西大学,2021.
- [19] NAKAZAWA N, OKAZAKI E. Recent research on factors influencing the quality of frozen seafood [J]. Fisheries Science, 2020, 86(2): 231-244.
- [20] 印婷,姜启兴,杨方,等.不同冻结方式对草鱼冻结特性的影响[J].食品科技,2020,45(7):152-158.
- [21] LV Y, CHU Y, ZHOU P, et al. Effects of different freezing methods on water distribution, microstructure and protein properties of cuttlefish during the frozen storage [J]. Applied Sciences, 2021, 11(15): 6866.
- [22] 汪小帆.不同冻结方式和复合抗冻剂对调理牛排品质的影响[D].无锡:江南大学,2019.
- [23] QIAN S, LI X, ZHANG C, et al. Effects of initial freezing rate on the changes in quality, myofibrillar protein characteristics and myowater status of beef steak during subsequent frozen storage [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 143(11): 148-156.
- [24] 张馨月,石金明,李凌云,等.液氮速冻与浸液式速冻对白切鸡食用品质的影响[J].南京农业大学学报,2021,44(5):958-965.
- [25] YANG Z, LIU S, SUN Q, et al. Insight into muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) frozen with liquid nitrogen at different temperatures [J]. Food Chemistry, 2022, 374(8): 131737.
- [26] JIN H, ZHANG Y, SHI M, et al. Impact of freezing technologies on the quality of catfish (*Ictalurus punctatus*) fillets: Insights from protein properties and ice crystal analysis [J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 173(3): 44-54.
- [27] POUDYAL R L, REDO M A, ISHIKAWA Y, et al. Effectiveness of supercooled freezing in suppressing ice recrystallization during frozen storage [J]. Food Structure, 2024, 42(4): 100391.
- [28] 郑小萌,刘晏玮,王金厢,等.不同冷冻方式对预制清蒸多宝鱼品质还原度的影响[C]//中国食品科学技术学会.中国食品科学技术学会第二十届年会论文摘要集.渤海大学食品科学与工程学院国家鱼糜及鱼糜制品加工技术研发分中心,2023:337-338.
- [29] 付彩霞,姜城红,王然,等.冻结方式对鱼香藕丸品质的影响[J].中国调味品,2024,49(4):148-153.
- [30] MOOSAVI-NASAB M, KHOSHNOUDI-NIA S, AZIMIFAR Z, et al. Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 5094.
- [31] SOYER A, ÖZALP B, DALMIŞ Ü, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat [J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1025-1030.
- [32] BOONSUMREJ S, CHAIWANICH SIRI 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.
- [33] BAO Y, ZHANG Y, XU W. Effects of different freezing rate and frozen storage temperature on the quality of Large-Mouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Molecules, 2023, 28(14): 5432.
- [34] KAALE L D, EIKEVIK T M. The influence of superchilling storage methods on the location/distribution of ice crystals during storage of Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. Food Control, 2015, 52(6): 19-26.
- [35] HOU Q, CHENG Y P, KANG D C, et al. Quality changes of pork during frozen storage: comparison of immersion solution freezing and air blast freezing [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(1): 109-118.
- [36] 顾赛麒,王锡昌,刘源,等.不同新鲜度冷却猪肉中挥发物的变化[J].江苏农业学报,2011,27(1):169-176.
- [37] WANG B, SUN Y, JIANG Q, et al. Effects of different reheating methods on lipid oxidation in frozen silver carp fish cakes [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(11): 8191-8203.
- [38] KAWABE S, MURAKAMI H, USUI M, et al. Changes in volatile compounds of living Pacific oyster *Crassostrea gigas* during air-exposed storage [J]. Fisheries Science, 2019, 85(4): 747-755.
- [39] XU Y, LIU Y, JIANG C, et al. Determination of volatile compounds in turbot (*Psetta maxima*) during refrigerated storage by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(12): 2464-2471.
- [40] CHENG H, WANG J, XIE J. Progress on odor deterioration of aquatic products: characteristic volatile compounds, analysis methods, and formation mechanisms [J]. Food Bioscience, 2023, 53(6): 102666.
- [41] CHEN Q, YANG X, HONG P, et al. GC-MS, GC-IMS, and E-Nose analysis of volatile aroma compounds in wet-Marinated fermented golden pomfret prepared using different cooking methods [J]. Foods, 2024, 13(3): 390.
- [42] CHEN Q, JIANG X, XIAO N, et al. Characterization of the effect of different sugar on volatile flavor compounds of dried fish floss using e-nose combined with HS-SPME /GC-MS [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(5): 17.
- [43] 刘慧雯,孙冲,孙德军,等.基于HS-SPME-GC-MS结合电子鼻分析熟制小龙虾冻藏过程中风味动态变化[J].肉类研究,2024, 38(8):33-41.
- [44] FU H, FENG Q, QIU D, et al. Improving the flavor of tilapia fish head soup by adding lipid oxidation products and cysteine [J]. Food Chemistry, 2023, 429(14): 136976.
- [45] LI K, ZHANG L, YI D, et al. Insights into the volatile flavor profiles of two types of beef tallow via electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry analysis [J]. Foods, 2024, 13(10): 1489.