

液氮冻结温度对冻藏黄鳝脂质氧化和 气味变化的影响

何相龙¹, 陈季旺^{1,2*}, 徐丽敏¹, 廖鄂^{1,2}, 路洪艳^{1,2}, 焦楚壹³

[1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 农产品加工与转化湖北省重点实验室(武汉轻工大学), 武汉 430023; 3. 湖北和远气体股份有限公司, 宜昌 443000]

摘要: **目的** 探讨液氮冻结温度对冻藏黄鳝脂质氧化和气味变化的影响。**方法** 测定液氮冻结(-50、-80、-110°C)和-20°C冰柜冻结(对照)的冻藏黄鳝的脂质和游离脂肪酸(free fatty acids, FFAs)含量、过氧化值(peroxide value, POV)、硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARs)、脂肪酸组成、挥发性气味物质, 并进行感官评价。**结果** 随着冻藏时间的延长, 整体上4种温度条件下黄鳝的脂质、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFAs)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFAs)含量显著下降($P<0.05$), FFAs、POV、TBARs值及饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFAs)含量显著上升($P<0.05$)。液氮冻结黄鳝的脂质、MUFAs、PUFAs含量和感官评分高于对照, -80°C和-110°C液氮冻结黄鳝的FFAs、SFAs含量显著低于-50°C液氮冻结和对照($P<0.05$); -80°C和-110°C液氮冻结黄鳝的脂质氧化差异基本上不显著($P>0.05$)。气相色谱-离子迁移谱法检测出25种挥发性气味物质。此外, 液氮冻结温度越低, 冻藏黄鳝的正己醛和正丙醛相对含量越低。**结论** 降低液氮冻结温度能够显著抑制冻藏黄鳝的脂质氧化和气味变化, 有效保护黄鳝的品质。

关键词: 黄鳝; 液氮冻结温度; 冻藏; 脂质氧化; 气味

Effects of liquid nitrogen freezing temperature on the lipid oxidation and odor changes of *Monopterus albus* during frozen storage

HE Xiang-Long¹ CHEN Ji-Wang^{1,2*}, XU Li-Min¹, LIAO E^{1,2}, LU Hong-Yan^{1,2}, JIAO Chu-Yi^{1,3}

[1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products (Wuhan Polytechnic University), Wuhan 430023, China; 3. Hubei He Yuan Gas Co. Ltd., Yichang 443000, China]

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of liquid nitrogen freezing temperature on lipid oxidation and odor changes of frozen *Monopterus albus*. **Methods** The lipid and free fatty acids (FFAs) content, peroxide value (POV), thiobarbituric acid reactive substances (TBARs) value, fatty acid composition, and volatile odor substances of *Monopterus albus* frozen at different liquid nitrogen temperatures (-50, -80, and -110°C) and at -20°C with freezer (control) were measured. In addition, organoleptic evaluation was also carried out. **Results** With the extension of frozen storage time, the lipid, monounsaturated fatty acids (MUFAs), and polyunsaturated fatty acids (PUFAs) content of

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(乡村振兴科技支撑项目)(2022BBA147)、湖北省重点研发计划项目(自主创新类项目)(2023BBB111)

Fund: Supported by the Key Research and Development Program of Hubei Province (Rural Revitalization Science and Technology Support Project) (2022BBA147), and the Key Research and Development Program of Hubei Province (Independent Innovation Project) (2023BBB111)

*通信作者: 陈季旺, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。E-mail: jiwangchen@whpu.edu.cn

*Corresponding author: CHEN Ji-Wang, Ph.D, Professor, Wuhan Polytechnic University, No.68, Xuefu South Road, Wuhan 430023, China. E-mail: jiwangchen@whpu.edu.cn

Monopterus albus under the 4 kinds of temperature conditions significantly decreased overall ($P<0.05$), while POV, TBARs value, and FFAs and saturated fatty acids (SFAs) content significantly increased overall ($P<0.05$). The lipid, MUFAs, and PUFAs content and organoleptic scores of *Monopterus albus* with liquid nitrogen were higher than the control. The FFAs and SFAs content of *Monopterus albus* with the -80°C and -110°C liquid nitrogen were significantly lower than -50°C liquid nitrogen and the control ($P<0.05$). However, there was basically no significant difference in lipid oxidation of *Monopterus albus* between the -80°C and -110°C liquid nitrogen ($P>0.05$). Twenty-five kinds of volatile odor substances were detected using gas chromatography-ion mobility spectrometry. Furthermore, the lower the liquid nitrogen frozen temperature, the lower the content of hexanal and propionaldehyde in frozen *Monopterus albus*. **Conclusion** Lowering the freezing temperature with liquid nitrogen can significantly inhibit lipid oxidation and odor changes of frozen *Monopterus albus*, leading to desirable quality attributes of the *Monopterus albus*.

KEY WORDS: *Monopterus albus*; liquid nitrogen freezing temperature; frozen storage; lipid oxidation; odor

0 引言

黄鳝(*Monopterus albus*)属合鳃目、合鳃科、黄鳝属,是一类体形细长,体表具有黏液的无鳞淡水鱼。黄鳝肉质无小刺,口感嫩滑具有弹性,是亚洲地区重要的水产种类之一,广泛分布于中国、日本、缅甸、俄罗斯亚洲地区、印度北部^[1-2]。2021年,我国黄鳝养殖产量约31万t,其中湖北产量13.84万t,占全国近一半的份额^[3]。黄鳝一直以鲜活消费为主,水分和蛋白质含量高、脂质中的脂肪酸主要为多不饱和脂肪酸,黄鳝宰杀后容易在微生物和内源酶的作用下发生品质劣变,导致其经济和食用价值降低,限制了黄鳝产业的发展,因此亟需研究黄鳝的低温保鲜技术。

冷冻是水产品贮藏保鲜保质最普遍的方法^[4-5]。传统的空气冻结法,由于空气的导热性差、冻结速度慢,在冻结过程中,细胞内外会形成较大的冰晶,脂质氧化速率较快,导致色泽、气味发生劣变等,对水产品品质造成负面影响^[6-7]。液氮冻结法能快速冻结水产品,并迅速通过最大冰晶生成带,形成的冰晶细小而均匀,对细胞的损伤程度轻,解冻后能更好地保持原有的品质^[8-11]。杨海琦等^[12]测定了3种冰柜冻结温度(-20°C 、 -40°C 、 -55°C)的小龙虾在冻藏期间的脂肪质量分数、游离脂肪酸(free fatty acids, FFAs)含量以及脂肪酸组成、过氧化值(peroxide value, POV)和硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactive substances, TBARs)值,表明随着冻藏时间的延长,相比 -20°C ,冻结温度 -40°C 和 -55°C 均减轻了小龙虾脂质的水解和氧化程度。YU等^[13]研究不同冻结方式(液氮冻结、 -35°C 鼓风冻结和 -18°C 冰柜冻结)对淡水虾在冻藏过程中总挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值、TBARs值和K值的影响,发现液氮冻结能有效抑制淡水虾的脂质氧化。同时,液氮冻结处理的淡水虾保质期比其他两种冻结方式分别延长了4周和8周。YANG等^[14]用不同液氮冻结温度(-35°C 、 -55°C 、 -75°C 、 -95°C 、 -115°C)冻结金鲳鱼,通过研究金鲳

鱼的冷冻速率、理化性质和显微组织结构,发现 -95°C 液氮冻结有效缩短了冷冻时间,改善了冷冻金鲳鱼的肌肉品质。然而,液氮冻结温度对黄鳝冻藏过程中脂质氧化和气味变化的影响目前未见报道。

本研究通过测定 -50°C 、 -80°C 、 -110°C 液氮和 -20°C 冰柜冻结(对照)的冻藏黄鳝片的脂质和FFAs含量、脂肪酸组成、POV、TBARs值及挥发性气味物质,结合感官评价,分析液氮冻结温度对黄鳝脂质氧化和气味变化的影响,明确较佳的液氮冻结温度,以期为黄鳝的冻结保鲜保质和加工提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄鳝[(8.88±0.25)g/片](湖北允泰坊食品有限公司)。

氯仿、甲醇、三氯甲烷、甲苯、吡啶乙酸铜、冰乙酸、碘化钾、三氯乙酸、五水合硫代硫酸钠、正丁醇、正己烷、氯化钾(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);2-硫代巴比妥酸(分析纯,上海源叶生物有限公司);三氟化硼-甲醇溶液(14%,山东西亚化工科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

LN2液氮速冻机[科威嘉尼(北京)科技有限公司];JYL-C010型绞肉机(九阳股份有限公司);7200型可见光分光光度计(上海尤尼柯仪器有限公司);7890B GC-MS气相色谱-质谱仪(美国安捷伦科技公司);Flavour Spec气相离子迁移谱联用仪、FS-SE-54-CB-1柱(15 m×0.53 mm,德国GAS公司);AL204千分之一分析天平[梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司];HP-88色谱柱(100 cm×0.25 mm, 0.10 μm,美国安捷伦科技有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 黄鳝前处理

将已去内脏、头和骨的黄鳝(死亡时间≤1 h)横向切分

成 40 mm×40 mm×8 mm 的黄鳝片在 2 h 内冰藏运输至实验室。随机取 190 g 黄鳝片平铺于保鲜盒内, 做好标记, 同法制备 80 盒, 使用液氮速冻柜并设置液氮冻结温度为-50、-80、-110℃, 以-20℃冰柜冻结为对照, 将温度计热电偶测温线插入黄鳝片的中心, 记录中心温度, 温度达到-18℃后转入-18℃冰柜冻藏 24 周。-50、-80、-110℃液氮冻结和对照的黄鳝通过最大冰晶生成带(-1~5℃)的时间分别为 880、1300、2300、39460 s。

1.3.2 脂质含量测定

参考邹舟等^[15]的方法, 略作修改。取冷藏解冻的黄鳝片于绞肉机内绞碎(100 g), 加入 100 mL 氯仿搅拌 5~6 次, 再加入 200 mL 甲醇匀浆搅拌 2 min, 于 25℃下静置。匀浆用布氏漏斗减压抽滤, 滤渣用 100 mL 氯仿搅拌萃取, 再次抽滤, 合并两次滤液, 置于 500 mL 烧杯中。滤液中加入 0.88%氯化钾溶液(100 mL), 搅拌混匀后转移至分液漏斗中, 静置分层 2 h, 取下层(氯仿层)于 50℃真空旋转蒸发去除氯仿, 制得总脂质。脂质含量按公式(1)计算:

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

其中: X 为黄鳝片中的脂质含量, %; m_2 为恒重的接收瓶和脂质质量, g; m_1 为接收瓶的质量, g; m 为黄鳝肉的质量, g。

1.3.3 FFAs 含量测定

参考杨海琦等^[12]的方法, 略作修改。称取 1.3.2 所得的 0.05 g 黄鳝油样, 溶于 5 mL 甲苯中, 然后加入 1 mL 的吡啶乙酸铜溶液(5 mg/mL), 将混合物振荡 2 min, 室温 3000 r/min 离心 5 min, 取上清液于 715 nm 下测定吸光值。结果用每 100 g 脂质中含游离脂肪酸的质量表示, g/100 g。

1.3.4 POV 测定

参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》滴定法。称取 1.3.2 所得的黄鳝油样 3 g(精确至 0.001 g), 置于 250 mL 碘量瓶中, 加入 30 mL 三氯甲烷-冰乙酸混合液, 轻轻振荡使油样完全溶解。准确加入 1 mL 饱和碘化钾溶液, 塞紧瓶盖, 并轻轻振 0.5 min, 在暗处放置 3 min。取出加 100 mL 水, 摇匀后立即用 0.01 mol/L 硫代硫酸钠标准滴定析出的碘, 滴定至淡黄色时, 加 1 mL 淀粉指示剂, 继续滴定并强烈振荡至溶液蓝色消失为终点。同时做空白试验。空白试验消耗 0.01 mol/L 硫代硫酸钠溶液体积 V_0 不得超过 0.1 mL。POV 按公式(2)计算:

$$X = \frac{(V - V_0) \times C \times 0.1269}{m} \times 100 \quad (2)$$

其中: X 为黄鳝片的 POV, g/100 g; V 为黄鳝油消耗的硫代硫酸钠标准溶液体积, mL; V_0 为空白消耗的硫代硫酸钠标准溶液体积, mL; C 为硫代硫酸钠标准溶液的浓度, mol/L; m 为黄鳝油的质量, g。

1.3.5 TBARs 值测定

参考 ÖZEN 等^[16]的方法, 略作修改。取冷藏解冻的黄鳝片于绞肉机内绞碎, 取绞碎的黄鳝肉糜 2 g, 加入 20 mL 10%的三氯乙酸溶液, 均质 1 min 后过滤。取 5 mL 过滤液加入 5 mL 0.02 mol/L 的硫代巴比妥酸溶液, 沸水浴加热 20 min, 混合物冷却至室温后用分光光度计测定 532 nm 下的吸光度。TBARs 值由黄鳝片中丙二醛(malonaldehyde, MDA)的质量分数表示, 按公式(3)计算:

$$X = \frac{C \times V}{m \times 1000} \quad (3)$$

其中: X 为黄鳝片的 MDA 含量, mg/kg; C 为从标准系列曲线中得到的 MDA 质量浓度, g/mL; V 为黄鳝溶液定容体积, mL; m 为黄鳝肉糜的质量, g。

1.3.6 脂肪酸组成分析

样品甲酯化: 取 1.3.2 得到的黄鳝油样 20 mg, 氮吹, 加入 2 mL 氢氧化钠-甲醇溶液(0.5 mol/L), 于 65℃水浴加热振荡反应 30 min, 取出冷却。加入 2 mL 新配制的三氟化硼-甲醇溶液, 于 70℃振荡反应 3~5 min, 取出冷却后加入 2 mL 正己烷萃取、2 mL 饱和氢氧化钠溶液促进溶液体系分层, 静置。取上层液过膜、移入样品瓶以备分析。

色谱条件: 色谱柱: HP-88 色谱柱(100 cm×0.25 mm, 0.10 μm, 美国安捷伦科技有限公司); 进样量 1 μL; 分流比 100:1; 进样口温度 280℃; 升温程序: 150℃保持 5 min, 以 3℃/min 升至 170℃, 保持 5 min, 3℃/min 升至 210℃, 保持 2 min, 最后以 10℃/min 升至 260℃, 保持 5 min, 载气为氦气(99.99%), 流速 1.2 mL/min。

质谱条件: 传输线温度 250℃, 离子源温度 230℃; 离子化模式为电轰击电离, 电子能量 70 eV, 分子离子扫描范围(m/z): 50~650; 扫描模式: 全扫描; 溶剂延迟: 5 min。

1.3.7 挥发性气味物质分析

取冷藏解冻的黄鳝片于绞肉机内绞碎, 取绞碎的黄鳝肉糜 2 g, 置于 20 mL 顶空瓶中。气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion migration spectrometry, GC-IMS)自动进样器参数: 顶空瓶孵化温度 60℃, 孵化时间 10 min, 孵化速度 500 r/min, 进样针温度 85℃, 进样体积 500 μL; 气相色谱相关参数: 色谱柱 FS-SE-54-CB-1 (15 m×0.53 mm), 色谱柱温度: 40℃, 载气: N₂, IMS 温度 45℃(漂移管温度 45℃, 流速 150 mL/min)。运行时间: 30 min, 载气起始流速 2 mL/min, 保持 2 min, 2~10 min 增至 10 mL/min, 10~20 min 增至 100 mL/min, 20~30 min 增至 150 mL/min。

1.3.8 感官评价

由 10 位评定人员对黄鳝片进行品质(气味、色泽、组织形态和质地)评价, 评价标准如表 1, 总分满分为 20 分。感官评价小组采用 5 分制, 对 4 种感官特性从 0 分(参数状况最差)到 5 分(参数状况最好)进行评级, 最后通过感官评分得出黄鳝片感官品质的直接信息。

表 1 黄鳝的感官评价标准
Table 1 Criteria for organoleptic evaluation of *Monopterus albus*

感官指标	好(5分)	较好(4分)	一般(3分)	较差(2分)	差(1分)
气味	黄鳝固有香味浓郁	黄鳝固有香味较浓郁	黄鳝固有香味清淡	黄鳝固有香味消失	有强烈的氨臭味
色泽	色泽正常,肌肉光泽良好	色泽正常,肌肉有光泽	色泽稍暗淡,肌肉稍有光泽	色泽较暗淡,肌肉缺乏光泽	色泽暗淡,肌肉失去光泽
组织状态	肌肉组织紧密,纹理清晰	肌肉组织较紧密,纹理较清晰	不紧密,但不松散	不紧密,局部松散	肌肉松散
质地	坚实有弹性,手压后凹陷迅速消失	坚实有弹性,手压后凹陷较快消失	有一定弹性,手压后凹陷消失较慢	稍有弹性,手压后凹陷恢复很慢	无弹性,手压后凹陷不恢复

1.4 数据处理

每组试验数据重复测定 3 次,结果用平均值±标准偏差表示。采用 Origin 2021 和 SPSS 26 软件对数据处理和统计分析,采用单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)检验进行 Duncan 差异分析, $P < 0.05$ 判定为差异显著。

2 结果与分析

2.1 液氮冻结温度对脂质水解的影响

脂质含量是黄鳝脂质水解的重要指标之一,反映了黄鳝脂质的水解程度。脂质受内源酶水解的影响,冻藏过程中会引起黄鳝品质和气味的劣变^[17-18]。液氮冻结温度对冻藏黄鳝脂质含量的影响如图 1(A)所示,4 组黄鳝的脂质含量整体呈下降趋势,可能是冻藏过程中,黄鳝细胞内外的冰晶体积在不断增大,破坏了细胞膜和细胞器,损伤的细胞释放大量内源酶导致脂质不断被水解^[19]。

第 0 周,液氮冻结和冰柜冻结黄鳝的脂质含量无显著差异 ($P > 0.05$); 第 6~24 周,对照的脂质含量显著下降 ($P < 0.05$); 第 24 周, -80、-110℃液氮冻结黄鳝的脂质含量显著高于对照 ($P < 0.05$)。冻藏结束时, -50、-80、-110℃液氮冻结黄鳝的脂质含量分别下降了 19.3%、11.0%、10.3%。

对照的脂质含量下降了 28.8%。与对照相比,液氮冻结黄鳝的脂质含量变化更小,这是因为黄鳝在 -20℃冰柜冻结过程中形成的冰晶更大,破坏了细胞膜,释放内源酶,促进了脂质水解。这表明液氮冻结延缓了冻藏黄鳝的脂质水解和氧化,且液氮冻结温度越低,脂质水解和氧化程度越轻。

FFAs 是脂质被脂肪酶水解的产物,FFAs 含量常被用来反映水产品的脂质水解程度^[20]。液氮冻结温度对冻藏黄鳝 FFAs 含量的影响如图 1(B)所示,4 组黄鳝的 FFAs 含量随冻藏时间的延长而增加,且对照的 FFAs 含量上升趋势明显。液氮冻结温度对冻藏黄鳝的 FFAs 含量影响显著 ($P < 0.05$),在整个冻藏过程中, -80、-110℃液氮冻结黄鳝的 FFAs 含量显著低于对照和 -50℃液氮冻结 ($P < 0.05$); 第 18~24 周, -110℃液氮冻结黄鳝的 FFAs 含量变化不显著 ($P > 0.05$)。与对照相比, -110℃液氮冻结黄鳝的 FFAs 含量在 0、6、12、18 和 24 周分别减少了 0.17、0.30、0.33、0.35、0.52 g/100 g,表明冰柜冻结黄鳝片的脂质水解更重。这是因为冰柜冻结速率缓慢,黄鳝细胞内外形成的冰晶较大且不均匀,导致在冻藏过程中细胞结构被破坏。这进一步表明液氮速冻抑制了黄鳝脂质的水解,且冻结温度越低,抑制效果越明显。

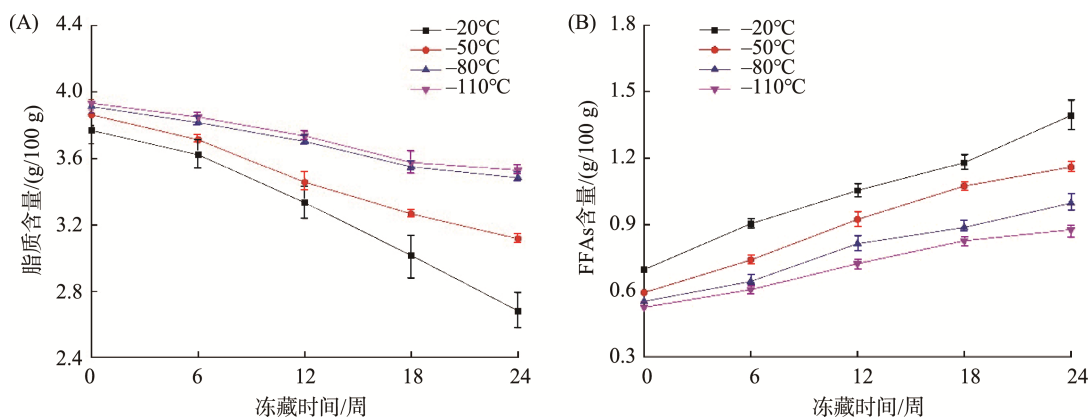


图 1 液氮冻结温度对冻藏黄鳝脂质和 FFAs 含量的影响

Fig.1 Effects of freezing temperature with liquid nitrogen on lipid and FFAs content of *Monopterus albus* during frozen storage

2.2 液氮冻结温度对脂质氧化的影响

POV 代表脂质氧化初级产物的含量, POV 越高, 冻藏期间黄鳝的脂质氧化越重^[21]。液氮冻结温度对冻藏黄鳝 POV 的影响如图 2(A)所示, 整个冻藏过程中, 4 组黄鳝的 POV 均逐渐升高, 这与唐一新等^[22]的研究结果类似, 南极磷虾在 -18°C 冻藏过程中 POV 逐渐升高。第 24 周, 对照的 POV 由 $0.20\ \mu\text{mol}/\text{kg}$ 升高到 $0.38\ \mu\text{mol}/\text{kg}$, 且显著高于液氮冻结($P<0.05$); 第 18~24 周, -80°C 、 -110°C 液氮冻结黄鳝的 POV 趋于稳定($P>0.05$)。这是因为, 液氮冻结黄鳝的冻结速率高, 生成的冰晶细小、细胞被破坏程度低, 因此减轻了冻藏过程中黄鳝脂质被氧化的程度。

TBARs 值代表脂质初级氧化产物被进一步氧化所产生的衍生物, 例如 MDA 等, 与 TBA 试剂反应物的含量, 常被用来评价水产品冻藏过程中脂质氧化酸败的程度, 是评价水产品品质变化的重要指标^[23-24]。冻藏过程中, 黄鳝的 TBARs 值越高, 表明脂质氧化越重。液氮冻结温度对冻藏黄鳝 TBARs 值的影响如图 2(B)所示, 随着冻藏时间的延长, 4 组黄鳝的 TBARs 值呈上升趋势。冻藏初期, -110°C 、 -80°C 、 -50°C 液氮冻结和对照的 TBARs 值分别为 0.31、0.33、

0.37、0.39 mg/kg, 经过 24 周的冻藏, 4 组黄鳝的 TBARs 值分别升高到 0.44、0.47、0.67、0.73 mg/kg。从第 6 周开始, 对照的 TBARs 值显著高于 -80°C 、 -110°C 液氮冻结($P<0.05$); 第 12~24 周, -80°C 和 -110°C 液氮冻结黄鳝的 TBARs 值无明显差异($P>0.05$)。这可能与黄鳝在冻结过程中的通过最大冰晶带时间、冰晶大小有关。石钢鹏等^[25]研究发现, 新鲜鲈鱼肉经过 24 周冻藏, 平板冻结鲈鱼肉的 TBARs 值显著高于液氮冻结。

2.3 液氮冻结温度对脂肪酸组成的影响

液氮冻结温度对冻藏黄鳝脂肪酸组成的影响见表 2, 黄鳝中被检测出的脂肪酸有 16 种, 分为饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFAs)和不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acids, UFAs)两类, 其中 UFAs 又可以分为 MUFAs 和 PUFAs。在所有脂肪酸中, 相对含量较高的有油酸($\text{C}_{18:1}$)、棕榈酸($\text{C}_{16:0}$)、棕榈烯酸($\text{C}_{16:1}$)、亚油酸($\text{C}_{18:2}$)和二十二碳六烯酸($\text{C}_{22:6}$)等, 这与温小波等^[26]研究的野生黄鳝脂肪酸相对含量的结果类似。脂肪酸的氧化分解与脂肪酸不饱和度、双键位置和构型有关, 双键数目越多, 氧化分解速度越快^[27]。

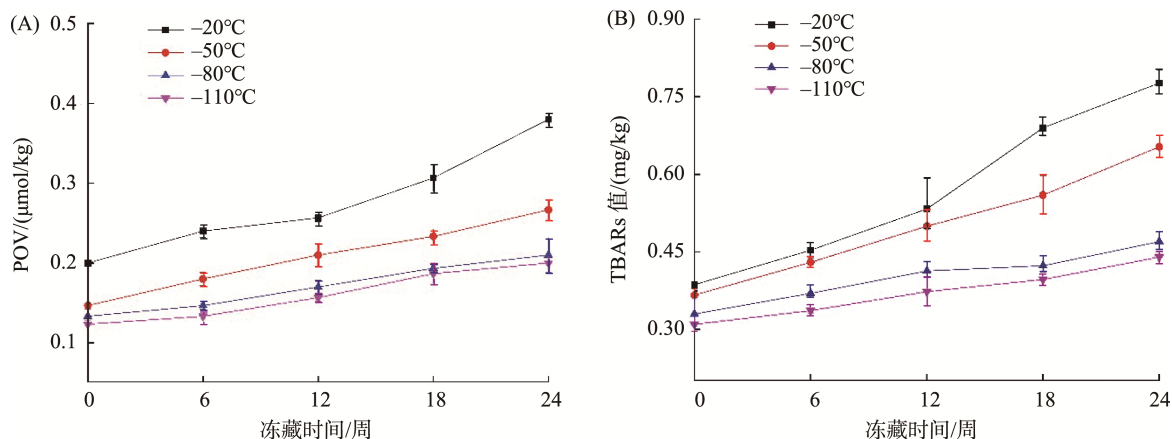


图 2 液氮冻结温度对冻藏黄鳝 POV 和 TBARs 值的影响

Fig.2 Effects of freezing temperature with liquid nitrogen on POV and TBARs value of *Monopterus albus* during frozen storage

表 2 液氮冻结温度对冻藏黄鳝脂肪酸组成的影响(%)

Table 2 Effects of freezing temperature with liquid nitrogen on fatty acid composition of *Monopterus albus* during frozen storage (%)

脂肪酸	第 0 周				第 6 周				第 12 周	
	-110°C	-80°C	-50°C	-20°C	-110°C	-80°C	-50°C	-20°C	-110°C	-80°C
肉豆蔻酸($\text{C}_{14:0}$)	3.11±0.05	3.08±0.02	3.12±0.05	3.17±0.08	3.26±0.04	3.41±0.02	3.57±0.05	3.62±0.14	3.48±0.13	3.54±0.05
十五烯酸($\text{C}_{15:0}$)	0.58±0.02	0.58±0.02	0.60±0.02	0.60±0.02	0.62±0.02	0.62±0.02	0.64±0.02	0.67±0.04	0.63±0.03	0.65±0.02
棕榈酸($\text{C}_{16:0}$)	22.8±0.2	22.9±0.2	23.4±0.2	23.6±0.2	23.6±0.1	23.9±0.1	24.6±0.1	25.3±0.3	24.2±0.2	24.6±0.0
十七烯酸($\text{C}_{17:0}$)	2.43±0.02	2.48±0.16	2.56±0.02	2.54±0.17	2.59±0.06	2.58±0.17	2.73±0.03	2.90±0.11	2.80±0.12	2.84±0.03
硬脂酸($\text{C}_{18:0}$)	5.11±0.05	5.14±0.07	5.18±0.05	5.21±0.05	5.43±0.11	5.48±0.18	5.70±0.06	5.85±0.01	5.60±0.07	5.71±0.06
肉豆蔻烯酸($\text{C}_{14:1}$)	0.26±0.01	0.26±0.03	0.25±0.03	0.25±0.03	0.25±0.03	0.23±0.02	0.22±0.02	0.21±0.02	0.23±0.01	0.22±0.02
棕榈烯酸($\text{C}_{16:1}$)	9.95±0.04	9.80±0.14	9.58±0.03	9.57±0.03	9.88±0.01	9.75±0.01	9.54±0.06	9.39±0.04	9.65±0.11	9.53±0.13
油酸($\text{C}_{18:1}$)	28.4±0.1	28.6±0.2	28.4±0.1	28.2±0.1	27.4±0.1	27.5±0.2	27.0±0.0	26.6±0.3	27.2±0.2	27.1±0.3

表 2(续)

脂肪酸	第 0 周				第 6 周				第 12 周	
	-110°C	-80°C	-50°C	-20°C	-110°C	-80°C	-50°C	-20°C	-110°C	-80°C
二十碳烯酸(C _{20:1})	1.09±0.04	1.08±0.03	1.07±0.02	1.08±0.02	1.07±0.01	1.07±0.02	1.02±0.01	0.99±0.02	1.05±0.03	1.03±0.02
亚油酸(C _{18:2})	9.83±0.04	9.82±0.15	9.71±0.05	9.62±0.05	9.81±0.03	9.51±0.07	9.35±0.07	9.21±0.15	9.70±0.07	9.45±0.03
亚麻酸(C _{18:3})	4.14±0.17	4.12±0.10	4.09±0.04	4.14±0.08	4.05±0.01	4.02±0.11	3.90±0.17	3.79±0.17	3.93±0.06	3.82±0.04
二十碳二烯酸(C _{20:2})	0.82±0.03	0.80±0.02	0.78±0.02	0.76±0.04	0.80±0.01	0.74±0.02	0.72±0.02	0.68±0.02	0.74±0.03	0.71±0.02
二十碳三烯酸(C _{20:3})	0.94±0.03	0.92±0.03	0.89±0.02	0.86±0.02	0.90±0.02	0.89±0.02	0.88±0.02	0.83±0.02	0.87±0.01	0.86±0.02
二十碳四烯酸(C _{20:4})	0.26±0.02	0.25±0.01	0.24±0.02	0.24±0.01	0.22±0.02	0.21±0.01	0.21±0.02	0.20±0.02	0.20±0.01	0.18±0.01
二十碳五烯酸(C _{20:5})	1.84±0.17	1.83±0.16	1.83±0.01	1.88±0.09	1.71±0.16	1.70±0.02	1.62±0.03	1.57±0.01	1.62±0.02	1.57±0.03
二十二碳六烯酸(C _{22:6})	8.42±0.08	8.34±0.03	8.38±0.03	8.25±0.10	8.36±0.15	8.32±0.07	8.32±0.16	8.14±0.03	8.12±0.02	8.17±0.04
ΣSFAs	34.0±0.3 ^b	34.2±0.0 ^b	34.8±0.4 ^a	35.2±0.4 ^a	35.5±0.3 ^c	36.0±0.1 ^{bc}	37.2±0.1 ^{ab}	38.4±0.6 ^a	36.7±0.2 ^d	37.3±0.1 ^c
ΣUFAs	66.0±0.3 ^a	65.8±0.1 ^a	65.2±0.5 ^b	64.8±0.1 ^b	64.5±0.1 ^a	64.0±0.1 ^{ab}	62.8±0.3 ^{bc}	61.6±0.6 ^c	63.3±0.2 ^a	62.7±0.2 ^b
ΣMUFAs	39.7±0.0 ^a	39.7±0.2 ^a	39.3±0.1 ^a	39.1±0.0 ^a	38.6±0.0 ^a	38.6±0.0 ^a	37.8±0.1 ^b	37.2±0.3 ^b	38.1±0.1 ^a	37.9±0.1 ^a
ΣPUFAs	26.3±0.3 ^a	26.1±0.0 ^a	25.9±0.4 ^b	25.7±0.1 ^b	25.9±0.1 ^a	25.4±0.1 ^{ab}	25.0±0.2 ^{ab}	24.4±0.3 ^b	25.2±0.1 ^a	24.8±0.1 ^{ab}
肉豆蔻酸(C _{14:0})	3.75±0.03	3.88±0.03	3.56±0.06	3.63±0.15	3.86±0.03	4.11±0.02	3.60±0.07	3.69±0.01	3.87±0.04	4.26±0.02
十五烯酸(C _{15:0})	0.67±0.02	0.69±0.03	0.64±0.02	0.66±0.01	0.68±0.02	0.72±0.02	0.65±0.02	0.67±0.01	0.69±0.01	0.74±0.02
棕榈酸(C _{16:0})	25.3±0.1	26.1±0.1	24.6±0.1	24.9±0.1	25.7±0.2	27.1±0.0	24.8±0.1	25.0±0.1	25.9±0.2	27.7±0.1
十七烯酸(C _{17:0})	2.96±0.17	3.00±0.11	2.88±0.18	2.92±0.07	3.06±0.02	3.15±0.01	2.90±0.01	2.96±0.15	3.07±0.17	3.28±0.04
硬脂酸(C _{18:0})	5.87±0.13	5.93±0.10	5.73±0.04	5.78±0.08	5.96±0.02	6.12±0.17	5.77±0.03	5.82±0.01	6.02±0.04	6.35±0.16
肉豆蔻烯酸(C _{14:1})	0.21±0.02	0.20±0.01	0.22±0.03	0.21±0.02	0.19±0.02	0.18±0.01	0.21±0.03	0.20±0.02	0.18±0.00	0.17±0.01
棕榈烯酸(C _{16:1})	9.27±0.08	9.17±0.04	9.60±0.14	9.38±0.19	9.19±0.05	9.02±0.04	9.50±0.06	9.34±0.04	9.13±0.01	8.91±0.09
油酸(C _{18:1})	26.5±0.2	26.1±0.1	26.9±0.1	27.0±0.0	26.2±0.2	25.4±0.1	26.9±0.1	27.0±0.1	26.1±0.0	24.9±0.1
二十碳烯酸(C _{20:1})	1.01±0.03	0.97±0.02	1.03±0.01	1.02±0.02	1.00±0.02	0.96±0.02	1.01±0.02	0.98±0.02	0.98±0.01	0.94±0.02
亚油酸(C _{18:2})	9.32±0.20	9.12±0.03	9.55±0.11	9.35±0.05	9.27±0.05	9.07±0.06	9.54±0.04	9.36±0.04	9.25±0.07	8.99±0.02
亚麻酸(C _{18:3})	3.77±0.16	3.71±0.17	3.85±0.03	3.74±0.18	3.73±0.17	3.67±0.06	3.84±0.02	3.74±0.02	3.66±0.02	3.61±0.02
二十碳二烯酸(C _{20:2})	0.71±0.01	0.66±0.02	0.71±0.01	0.71±0.01	0.70±0.02	0.60±0.03	0.69±0.01	0.71±0.01	0.69±0.00	0.59±0.01
二十碳三烯酸(C _{20:3})	0.85±0.02	0.79±0.02	0.86±0.01	0.84±0.01	0.83±0.01	0.77±0.03	0.85±0.01	0.82±0.01	0.82±0.01	0.76±0.01
二十碳四烯酸(C _{20:4})	0.17±0.01	0.16±0.02	0.19±0.02	0.16±0.01	0.15±0.01	0.12±0.00	0.15±0.01	0.14±0.01	0.12±0.02	0.07±0.00
二十碳五烯酸(C _{20:5})	1.55±0.03	1.39±0.03	1.59±0.04	1.56±0.03	1.52±0.01	1.34±0.02	1.58±0.02	1.55±0.02	1.53±0.01	1.24±0.00
二十二碳六烯酸(C _{22:6})	8.11±0.16	8.08±0.02	8.06±0.02	8.09±0.01	8.05±0.07	7.64±0.08	8.05±0.06	8.03±0.06	7.98±0.02	7.55±0.00
ΣSFAs	38.5±0.2 ^b	39.6±0.1 ^a	37.4±0.2 ^c	37.8±0.2 ^c	39.2±0.2 ^b	41.2±0.2 ^a	37.7±0.1 ^d	38.1±0.1 ^c	39.6±0.0 ^b	42.3±0.1 ^a
ΣUFAs	61.5±0.3 ^c	60.4±0.2 ^d	62.6±0.3 ^a	62.2±0.3 ^a	60.8±0.2 ^b	58.8±0.4 ^c	62.3±0.3 ^a	61.9±0.1 ^b	60.4±0.1 ^c	57.7±0.1 ^d
ΣMUFAs	37.0±0.1 ^b	36.5±0.1 ^b	37.8±0.1 ^a	37.7±0.2 ^a	36.5±0.0 ^b	35.6±0.1 ^c	37.6±0.2 ^a	37.5±0.0 ^a	36.4±0.0 ^b	34.9±0.0 ^c
ΣPUFAs	24.5±0.2 ^b	23.9±0.1 ^c	24.8±0.2 ^a	24.5±0.1 ^a	24.2±0.2 ^a	23.2±0.3 ^b	24.7±0.1 ^a	24.3±0.1 ^b	24.0±0.1 ^b	22.8±0.1 ^c

注: 小写字母表示相同时间点组间显著差异($P<0.05$)。

冻藏过程中, 4 组黄鳝中的 SFAs 相对含量上升, MUFAs 和 PUFAs 相对含量下降。这可能是 UFAs 含有双键且不饱和程度高, 易被氧化分解成 SFAs^[28]。-50、-80、-110°C液氮冻结和对照的 UFAs 相对含量分别降低了 3.7%、3.9%、4.8%和 7.1%。在第 24 周, -50、-80、-110°C液氮冻结黄鳝的 UFAs 相对含量均显著高于对照($P<0.05$)。这表明液氮冻结有效降低了黄鳝 UFAs 的氧化降解程度。

2.4 液氮冻结温度对挥发性气味物质的影响

挥发性气味物质是评价鱼肉品质重要指标之一, 其中, 醛类、酯类、醇类、含硫杂环化合物等气味物质的阈值较低且种类较多, 是鱼肉整体气味的主要贡献物质^[29]。

图 3 表示 GC-IMS 检测 4 组冻藏黄鳝挥发性气味物质的指纹图谱。横坐标代表气味物质, 纵坐标代表冻结温度和冻藏时间, 红点均表示挥发性物质, 颜色的深浅表示挥

发性物质浓度的大小^[30]。

GC-IMS 从冻藏黄鳝中共鉴定挥发性气味物质 25 种(表 3), 其中酯类 8 种、醇类 6 种、酮类 4 种、醛类 3 种、烯类 2 种、醚类 1 种, 其他化合物 1 种。冻藏黄鳝挥发性气味物质的种类和浓度明显不同。由图 3 可知, 冻藏黄鳝的挥发性气味物质中, 正己醛、异戊醛、正丙醛、左旋-β-蒎烯、乙酸乙酯、顺-3-己烯醇、甲酸乙酯、2-甲基丙醇、5-甲基-2-庚烯-4-酮、2-甲基四氢呋喃-3-酮、异丙硫醇等的含量较高, 这些气味物质可能对冻藏黄鳝片的气味影响较大, 其中正己醛和正丙醛表现为鱼腥味, 异戊醛表现为脂肪味; 甲酸乙酯、乙酸乙酯、2-甲基丙醇、5-甲基-2-庚烯-4-酮表现为果香味; 顺-3-己烯醇表现为青草味; 2-甲基四氢呋喃-3-酮表现为麝香味; 左旋-β-蒎烯表现为松脂香气; 异丙硫醇表现为刺激性气味。

由图 3 和表 3 可以看出, 随着冻藏时间的延长, 4 组黄鳝的顺-3-己烯醇、左旋-β-蒎烯、5-甲基-2-庚烯-4-酮、甲酸乙酯和正己醛相对含量不断增大, 而乙酸甲酯、甲醚、2-甲基四氢呋喃-3-酮相对含量逐渐减少, 表明黄鳝在冻藏期间气味发生了改变。冻藏第 0 和 24 周时, 对照的甲酸乙酯和正己醛含量高于液氮冻结, 且液氮冻结温度越低, 冻

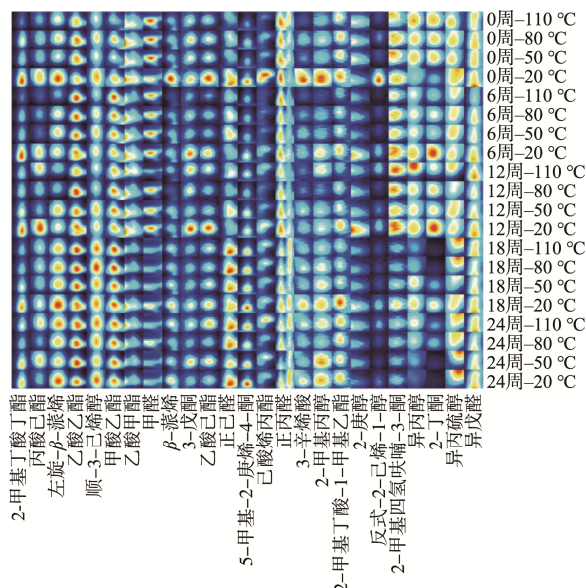


图 3 液氮冻结温度对冻藏黄鳝挥发性气味物质指纹图谱的影响
Fig.3 Effects of freezing temperature with liquid nitrogen on fingerprint for volatile odor substances of *Monopterus albus* during frozen storage

表 3 液氮冻结温度对冻藏黄鳝挥发性气味物质的影响

Table 3 Effect of freezing temperature with liquid nitrogen on volatile odor substances of *Monopterus albus* during frozen storage

编号	物质	化学式	计算保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms
1	2-甲基丁酸丁酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	1232.0	357.377	1.3822
2	丙酸己酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	1090.7	238.251	1.4363
3	左旋-β-蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	974.3	147.804	1.2973
4	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	910.3	110.301	1.3359
5	顺-3-己烯醇	C ₆ H ₁₂ O	867.8	90.447	1.2201
6	甲酸乙酯	C ₃ H ₆ O ₂	800.3	66.181	1.2201
7	乙酸甲酯	C ₃ H ₆ O ₂	800.3	66.181	1.1892
8	二甲醚	C ₂ H ₆ O	314.6	24.266	1.0695
9	β-蒎烯	C ₁₀ H ₁₆	1008.8	172.070	1.2973
10	3-戊酮	C ₅ H ₁₀ O	1002.8	167.658	1.3552
11	乙酸己酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	1008.8	172.070	1.4054
12	正己醛	C ₆ H ₁₂ O	800.3	66.181	1.2625
13	5-甲基-2-庚烯-4-酮	C ₈ H ₁₄ O	967.6	143.392	1.2162
14	己酸烯丙酯	C ₉ H ₁₆ O ₂	1075.0	225.015	1.3861
15	正丙醛	C ₃ H ₆ O	821.3	72.799	1.1429
16	3-辛烯酸	C ₈ H ₁₄ O ₂	1130.0	271.342	1.3398
17	异丁醇	C ₄ H ₁₀ O	1085.5	233.839	1.3591
18	2-甲基丁酸-1-甲基乙酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	1061.7	213.985	1.2857
19	2-庚醇	C ₇ H ₁₆ O	901.6	105.889	1.3861
20	反式-2-己烯-1-醇	C ₆ H ₁₂ O	857.2	86.035	1.5058
21	2-甲基四氢呋喃-3-酮	C ₅ H ₈ O ₂	784.5	61.769	1.4286
22	异丙醇	C ₃ H ₈ O	511.5	35.296	1.1815
23	2-丁酮	C ₄ H ₈ O	590.3	39.709	1.2432
24	异丙硫醇	C ₃ H ₈ S	550.8	37.503	1.1544
25	3-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	878.0	94.859	1.1892

藏黄鳝的正己醛和正丙醛相对含量越低, 这表明降低液氮冻结温度能减轻冻藏黄鳝的气味变化。冻藏第 24 周, -110°C 液氮冻结黄鳝的乙酸甲酯、乙酸乙酯和乙酸烯丙醇含量高于-80°C、-50°C 液氮冻结和对照, 正己醛和正丙醛含量低于-80°C、-50°C 液氮冻结和对照, 进一步表明较低的液氮冻结温度可以改善冻藏黄鳝的气味。

2.5 液氮冻结温度对感官评分的影响

由表 4 可以看出, 第 0 周时, 4 组黄鳝的色泽正常, 肌肉切面富有光泽、有黄鳝固有气味, 组织紧密纹理清晰, 质地坚实有弹性, 感官评分最高。随着冻藏时间的延长, 4

组黄鳝的感官评分呈下降趋势。冻藏 18 周后, -80、-110°C 液氮冻结黄鳝的感官评分显著高于对照和-50°C 液氮冻结 ($P<0.05$)。整个冻藏过程中, -110°C 液氮冻结黄鳝的感官评分最高, 这是因为-110°C 液氮冻结速度快, 通过最大冰晶生成带时间短, 黄鳝肌肉细胞内外形成的冰晶小, 肌纤维被破坏程度低, 使得黄鳝在冻藏期间保有较好的品质。这些结果表明液氮冻结温度越低, 在冻藏过程中黄鳝片品质保持越好。本研究结果与李想等^[31]的研究类似, -80°C 液氮喷淋冻结的草鱼片品质显著高于-18°C 冷风冻结和-60°C 液氮喷淋冻结。

表 4 液氮冻结温度对冻藏黄鳝感官评分的影响

Table 4 Effects of freezing temperature with liquid nitrogen on organoleptic scores of *Monopterus albus* during frozen storage

冻藏时间	冻结温度/°C	气味	色泽	组织状态	质地	总分
第 0 周	-110	5.00	4.83	5.00	5.00	19.83 ^{Aa}
	-80	4.67	5.00	5.00	5.00	19.67 ^{Aa}
	-50	4.33	5.00	5.00	5.00	19.33 ^{ABa}
	-20	4.00	5.00	5.00	4.67	18.67 ^{Ba}
第 6 周	-110	5.00	4.83	4.83	4.83	19.50 ^{Aa}
	-80	4.67	5.00	4.83	4.83	19.33 ^{Aa}
	-50	4.33	4.83	5.00	4.83	19.00 ^{ABa}
	-20	3.83	4.83	4.83	4.67	18.18 ^{Ba}
第 12 周	-110	4.50	4.83	4.50	4.83	18.67 ^{Ab}
	-80	4.33	4.83	4.33	4.67	18.17 ^{ABb}
	-50	4.17	4.67	4.33	4.17	17.33 ^{Bb}
	-20	4.00	4.50	4.00	3.50	16.00 ^{Cb}
第 18 周	-110	4.50	4.50	4.67	4.50	18.17 ^{Ab}
	-80	4.33	4.83	4.17	4.50	17.83 ^{Ab}
	-50	4.00	4.67	4.00	4.17	16.83 ^{Bb}
	-20	3.33	4.17	4.00	4.00	15.50 ^{Cb}
第 24 周	-110	4.00	4.50	4.67	4.83	18.00 ^{Ab}
	-80	4.00	4.33	4.50	4.50	17.33 ^{Ab}
	-50	4.00	4.00	4.00	4.17	16.17 ^{Bc}
	-20	3.17	3.67	3.83	3.50	14.17 ^{Cc}

注: 不同大写字母表示同时间点组间显著差异, 不同小写字母表示表示组内显著差异($P<0.05$)。

3 结 论

相比对照组, 液氮冻结的速率快, 能使黄鳝迅速冻结。冻藏期间, -80、-110°C 液氮冻结组黄鳝的脂质、MUFAs 和 PUFAs 含量和感官评分高于对照, POV、TBARs 值及 FFAs、SFAs 含量显著低于对照 ($P<0.05$); -80°C 和-110°C 液氮冻结黄鳝的及 FFAs、SFAs 和荧光化合物含量显著低于-50°C 液氮冻结和对照 ($P<0.05$)。本研究结果表明, 较低的液氮冻结温度提高了冻结速率, 使黄鳝快速通过最大冰晶生成带, 形成的冰晶细小均匀, 减轻了对肌纤维的破坏程度, 显著抑制了冻藏黄鳝脂质的水解和氧化, 改善冻藏黄鳝的色泽、气味, 有效保护冻藏黄鳝的品质, 延长黄鳝的冻藏保存时间。-80°C 和-110°C 液氮冻结黄鳝的脂质氧化差异基本上不显著, 基于节省生产成本考虑, 工业生产可选择-80°C 液氮冻结温度。

参考文献

- [1] SOW AY, ISMAIL A, ZULKIFLI SZ, *et al.* Survey on heavy metals contamination and health risk assessment in commercially valuable Asian swamp eel, *Monopterus albus* from Kelantan, Malaysia [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 9391-9399.
- [2] 吴秀林. 不同体色黄鳝生长性能、营养价值评价及遗传多样性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
WU XL. Evaluate of growth performance and nutritive composition and analysis of genetic diversity in different body color ricefield eel (*Monopterus albus*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [3] 农业部渔业局编制. 中国渔业统计年鉴: 2022[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Compiled by the Fisheries Bureau of the Ministry of Agriculture. China fishery statistical yearbook: 2022 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.
- [4] HU YM, ZHANG NH, WANG H, *et al.* Effects of prefreezing methods and storage temperatures on the qualities of crucian carp (*Carassius auratus* var. *pengze*) during frozen storage [J]. *J Food Process Pres*, 2020, 45(2): e15139.

- [5] SUN QX, SUN FD, XIA XF, *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]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 51: 281–291.
- [6] ZHU ZW, ZHOU QY, SUN DW. Measuring and controlling ice crystallization in frozen foods: A review of recent developments [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 90: 13–25.
- [7] SARAGUSTY J, GACITUA H, ROZENBOIM I, *et al.* Do physical forces contribute to cryodamage? [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2009, 104(4): 719–728.
- [8] CAO H, ZHAO Y, ZHU YB, *et al.* Antifreeze and cryoprotective activities of ice-binding collagen peptides from pig skin [J]. *Food Chem*, 2016, 194: 1245–1253.
- [9] ZHOU GH, XU XL, LIU Y. Preservation technologies for fresh meat-A review [J]. *Meat Sci*, 2010, 86(1): 119–128.
- [10] TAN MT, MEI J, XIE J. The formation and control of ice crystal and its impact on the quality of frozen aquatic products: A review [J]. *Crystals*, 2021, 11(1): 68.
- [11] 周俊鹏, 朱萌, 章蔚, 等. 不同冷冻方式对淡水鱼品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 247–254.
ZHOU JP, ZHU M, ZHANG W, *et al.* Effect of different freezing methods on the quality of freshwater fish [J]. *Food Sci*, 2019, 40(17): 247–254.
- [12] 杨海琦, 陈季旺, 徐言, 等. 冻结及冻藏温度对小龙虾冻藏过程中脂质氧化的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(23): 220–227.
YANG HQ, CHEN JW, XU Y, *et al.* Effect of freezing temperature and frozen storage temperature on lipid oxidation of red swamp crawfish [J]. *Food Sci*, 2022, 43(23): 220–227.
- [13] YU LX, JIANG QX, YU DW, *et al.* Quality of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) during the storage at -18°C as affected by different methods of freezing [J]. *Int J Food Prop*, 2018, 21(1): 2100–2109.
- [14] YANG ZM, LIU SC, SUN QX, *et al.* Insight into muscle quality of golden pompano (*Trachinotus ovatus*) frozen with liquid nitrogen at different temperatures [J]. *Food Chem*, 2022, 374(16): 131737.
- [15] 邹舟, 王琦, 于刚, 等. 鲢鱼各部位磷脂组分及脂肪酸组成分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(24): 105–109.
ZOU Z, WANG Q, YU G, *et al.* Lipid classes and fatty acid composition of phospholipids from different parts of silver carp [J]. *Food Sci*, 2014, 35(24): 105–109.
- [16] ÖZEN BÖ, EREN M, PALA A, *et al.* Effect of plant extracts on lipid oxidation in minced fish muscle [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2011, 46(4): 724–731.
- [17] KARLSDOTTIR MG, SVEINSDOTTIR K, KRISTINSSON HG, *et al.* Effects of temperature during frozen storage on lipid deterioration of saithe (*Pollachius virens*) and hoki (*Macruronus novaezelandiae*) muscles [J]. *Food Chem*, 2014, 156: 234–242.
- [18] 毛俊龙. 茶黄素对大黄鱼贮藏过程中品质特性的影响作用[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
MAO JL. Effect of theaflavin on quality characteristic of large yellow croaker during storage [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [19] BANERJEE S. Inhibition of mackerel (*Scomber scombrus*) muscle lipoxygenase by green tea polyphenols [J]. *Food Res Int*, 2005, 39(4): 486–491.
- [20] DE-ABREU DA, LOSADA PP, MAROTO J, *et al.* Lipid damage during frozen storage of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) in active packaging film containing antioxidants [J]. *Food Chem*, 2011, 126(1): 315–320.
- [21] SABOLOVÁ M, JOHANIDESOVÁ A, HASALIKOVÁ E, *et al.* Relationship between the composition of fats and oils and their oxidative stability at different temperatures, determined using the *Oxipres apparatus* [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2017, 119(9): 1600454.
- [22] 唐一新, 陈京美, 冷凯良, 等. 南极磷虾冻藏过程中脂质品质的变化[J]. *食品科技*, 2018, 43(6): 149–153.
- TANG YX, CHEN JM, LENG KL, *et al.* Lipid quality changes of antarctic krill (*Euphausia superba*) during frozen storage [J]. *Food Sci Technol*, 2018, 43(6): 149–153.
- [23] 王罡. 油脂反复使用对其氧化特性及油炸鱼豆腐的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2014.
WANG G. The effect of oil's repeated use on its oxidation characteristics and fried food's quality characteristics [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2014.
- [24] FAUSTMAN C, SUN Q, MANCINI R, *et al.* Myoglobin and lipid oxidation interactions: Mechanistic bases and control [J]. *Meat Sci*, 2010, 86(1): 86–94.
- [25] 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 GP, GAO TL, QIAN XQ, *et al.* Effects of different quick-freezing treatments on the quality changes of largemouth bass meat during frozen storage [J]. *Meat Res*, 2020, 34(12): 68–74.
- [26] 温小波, 李伟国, 周永平. 野生乌鳢、鲟、黄颡鱼和黄鳝的脂类及脂肪酸组成比较[J]. *湖北农学院学报*, 2003, (3): 169–173.
WEN XB, LI WG, ZHOU YP. Comparative analysis on crude lipid and fatty acids of four wild freshwater fishes [J]. *J Hubei Agric Univ*, 2003, (3): 169–173.
- [27] 黄莉, 孔保华, 李菁, 等. 氧化引起肉及肉制品品质劣变的机理及影响因素[J]. *食品科学*, 2011, 32(9): 319–323.
HUANG L, KONG BH, LI Q, *et al.* Advances in studies of quality deterioration mechanism of meat and meat products caused by oxidation and influencing factors [J]. *Food Sci*, 2011, 32(9): 319–323.
- [28] 蔡秋杏, 吴燕燕, 李来好, 等. 厦门白姑鱼腌制加工过程中的脂肪酸变化分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(12): 76–81.
CAI QX, WU YY, LI LH, *et al.* Changes in fatty acids during salting and drying of white croaker (*Argyrosomus amoyensis*) [J]. *Food Sci*, 2015, 36(12): 76–81.
- [29] 贾哲, 陈晓婷, 潘南, 等. 双斑东方鲀在冷藏保鲜过程中挥发性风味物质的变化[J]. *食品科学*, 2021, 42(20): 188–196.
JIA Z, CHEN XT, PAN N, *et al.* Changes of volatile flavor compounds in *Takifugu bimaculatus* during refrigeration storage [J]. *Food Sci*, 2021, 42(20): 188–196.
- [30] GERHARDT N, BIRKENMEIER M, SANDERS D, *et al.* Resolution-optimized headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) for non-targeted olive oil profiling [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2017, 409(16): 3933–3942.
- [31] 李想, 任章睿, 胡杨, 等. 液氮冻结温度对调理草鱼片品质的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(4): 200–208.
LI X, REN ZR, HU Y, *et al.* Effect of liquid nitrogen freezing temperature on quality of seasoned grass carp fillets [J]. *J Huazhong Agric Univ*, 2021, 40(4): 200–208.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



何相龙, 硕士, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。
E-mail: 18717187739@163.com



陈季旺, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。
E-mail: jiwangchen@whpu.edu.cn