姜金辉, 粟燕, 侯江霞, 等. 包冰衣熟制小龙虾虾尾冷冻贮藏期间品质变化规律 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 399−406. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030039

JIANG Jinhui, SU Yan, HOU Jiangxia, et al. Research on Quality Changes of Crayfish Tail with Ice-coating during Frozen Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 399−406. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030039

· 贮运保鲜 ·

包冰衣熟制小龙虾虾尾冷冻贮藏期间品质变化规律

姜金辉[1,2], 粟　燕[1], 侯江霞[1,2], 汪　兰[1,2], 周　志[2], 吴文锦[1], 乔　宇[1], 熊光权[1,2], 柳　静[3], 康　峻[4], 石　柳[1,2,*]

(1.农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 特色农产品资源挖掘与高质利用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430064;
2.湖北民族大学生物与食品工程学院, 湖北恩施 445000;
3.湖北新柳伍食品集团有限公司, 湖北潜江 433100;
4.湖北潜网生态小龙虾产业园集团有限公司, 湖北潜江 433115)

摘　要: 为探究长期冻藏过程中包冰衣小龙虾虾尾品质变化，该文以包冰衣的小龙虾虾尾为研究对象，测定在−18 ℃冷冻贮藏 6 个月期间小龙虾虾尾感官评价、质构特性（TPA）、总挥发性盐基氮（TVB-N）、pH、硫代巴比妥酸值（TBARS）、羰基含量及活性巯基含量的变化，并做相关性分析。结果表明，在−18 ℃条件下冷冻贮藏 6 个月期间，包冰衣熟制小龙虾虾尾的各项指标均未超出标准限值，然而随着冷冻贮藏时间的延长，其 TVB-N、TBARS 和羰基含量显著上升（P<0.05），活性巯基含量呈先上升后下降趋势，在贮藏第 3~4 个月达到峰值，硬度与弹性呈波动下降趋势，且第 3 个月时硬度达到最高值（3680.48 g），而感官评分显著下降（P<0.05），在贮藏 3 个月时，包冰衣小龙虾仍保留新鲜产品 80% 的品质。综合以上指标变化，确定包冰衣小龙虾虾尾的最佳赏味期为 3 个月。相关性分析表明，小龙虾虾尾冻藏过程中的品质变化主要受蛋白质分解和脂质氧化的影响。该研究为提升工业化加工小龙虾贮藏品质提供理论基础。

关键词: 冷冻贮藏, 包冰衣小龙虾虾尾, 品质, 相关性分析

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0399−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030039

本文网刊:

Research on Quality Changes of Crayfish Tail with Ice-coating during Frozen Storage

JIANG Jinhui[1,2], SU Yan[1], HOU Jiangxia[1,2], WANG Lan[1,2], ZHOU Zhi[2], WU Wenjin[1], QIAO Yu[1], XIONG Guangquan[1,2], LIU Jing[3], KANG Jun[4], SHI Liu[1,2,*]

(1.Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Hubei Key Laboratory of Characteristic Resources and Utilization, Wuhan 430064, China;
2.College of Biology and Food Engineering, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China;
3.Hubei Xinliuwu Food Group Co., Ltd., Qianjiang 433100, China;
4.Hubei Qianwang Ecological Crayfish Industrial Park Group Co., Ltd., Qianjiang 433115, China)

Abstract: This study aimed to investigate the quality changes of ice-coating red swamp crayfish tails during long-term

收稿日期: 2025−03−05

基金项目: 湖北省重点研发项目（2024BBB079）; 武汉都市圈协同创新科技项目（2024070904020441）; 湖北省技术创新专项（重大项目）揭榜制科技项目（2023BEB030）; 湖北省技术创新专项（重大项目）揭榜制科技项目（2022BEC030）。

作者简介: 姜金辉（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 淡水产品加工与贮藏, E-mail: 19853506709@163.com。

*** 通信作者:** 石柳（1988−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: shiliu@hbaas.com。

frozen storage. Ice-coated crayfish tails were considered as the research object, and attributes including sensory evaluation, texture profile analysis (TPA), total volatile basic nitrogen (TVB-N), pH, thiobarbituric acid reactive substances (TBARS), protein carbonyl content, and active sulfhydryl content, were systematically monitored over six months of storage at −18 ℃. Correlation analysis was also conducted based on the research results. The results showed that during the 6-month frozen storage at −18 ℃, the indexes of the cooked crayfish tails with ice coating did not exceed the standard limits, but with the extension of the frozen storage time, the contents of TVB-N, TBARS and carbonyl groups in the tail of crayfish coated with ice increased significantly (P<0.05), and the content of active sulfhydryl groups increased first and then decreased, reaching the peak in the 3rd~4th months of storage, and the hardness and elasticity showed a fluctuating downward trend, and the hardness reached the highest value (3680.48 g) at the 3rd month, while the sensory score decreased significantly (P<0.05), and the quality of fresh products was still retained by 80% of the crayfish after 3 months of storage. Based on the changes of the above indicators, it was determined that the best tasting period of ice-coated crayfish tails was 3 months. According to the correlation analysis, protein degradation and fat oxidation might be the dominant factors contributed to the quality deterioration of ice-coated crayfish tails during frozen storage. This work provided theory basis for the promotion of industrial processed crayfish storage quality.

Key words: frozen storage; ice-coated crayfish tail; quality; correlation analysis

小龙虾，学名为克氏原螯虾（*Procambarus clarkii*），是一种甲壳类动物，虾肉含有丰富的游离氨基酸、不饱和脂肪酸及蛋白质，风味独特，在全国范围内深受消费者喜爱。2023 年我国小龙虾养殖面积达到 2950 万亩、产量 316.10 万吨[1]，并将持续较快增长，已成为我国长江中下游淡水养殖的优势经济物种。“十四五”期间，湖北省为促进农业事业的持续创新与发展，特别推出了“虾十条”政策，推广“四季有虾”的理念，旨在推动小龙虾产业的高质量发展。湖北潜江是全国小龙虾养殖、加工、交易流通集散地，包括“湖北新柳伍集团”“楚虾王”“绿亿园”“华山”“莱克”等在内的 48 家小龙虾加工企业，加入了潜江市的“满园工程”，共同推动区域品牌价值的提升。

小龙虾的产品类型包括整只虾、虾尾和虾仁。虾尾食用方便，除国内市场外，还出口到欧洲、北美和东南亚，市场占有率高。目前工厂通用的虾尾加工工艺为：鲜活虾在分拣后，清洗、漂烫、去头、速冻、包冰衣、冷冻贮藏[2]。漂烫可杀灭小龙虾表面微生物和降低内源性酶活，而包冰衣不仅能够有效隔绝氧气，减少小龙虾与外界环境的接触，还能提升产品的外观品质。此外，包冰衣使得小龙虾在运输、加工和烹饪过程中更加便捷，因此市面上的虾尾产品主要是包冰衣熟制虾尾。前期调研发现，当虾尾长时间冷冻贮藏后，虾肉多出现不同程度的肉质变硬、变散、风味减退等问题，食用品质显著下降。而冷冻制品品质主要受原料特性、冷冻速率、贮藏温度、加工工艺、包装方式及运输销售环节等多种因素影响[3]，这些因素共同作用于食品的微观结构和化学成分，从而影响其感官、品质、风味和货架期[4−7]。

目前，包冰衣工艺普遍应用于冻虾延缓品质劣变，而包冰衣熟制小龙虾虾尾在贮藏期品质变化规律尚未见报道。本文监测了包冰衣熟制小龙虾虾尾在−18 ℃ 冷冻贮藏 6 个月期间的感官品质、理化性质（质构特性、pH、挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸值）和生化性质（羰基含量、巯基含量）的变化情况，并进行相关性分析，系统解析冰衣处理熟制小龙虾尾的品质变化规律，为提升工业化加工小龙虾贮藏品质提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

包冰衣熟制小龙虾虾尾　由湖北新柳伍食品集团有限公司提供，于五月份生产，当天通过冷链 6 h 内运输至实验室；硼酸、氧化镁、盐酸、乙醇、甲基红、溴甲酚绿、2-硫代巴比妥酸、EDTA、三氯乙酸等分析纯，国药集团化学试剂有限公司；羰基含量试剂盒　南京建成生物工程研究所。

A500-36D-S 均匀分散机　上海昂尼仪器仪表有限公司；GTR10-1 台式高速冷冻离心机　北京时代北利离心机有限公司；BSA224S 电子天平　赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；Ta.XT 2i/50 型质构仪　英国 Stable Micro Ssytem 公司；BCD-575WDBI 冰箱　青岛海尔股份有限公司；HH-ZK2 恒温水浴锅　巩义市予华仪器有限责任公司；Spark 酶标仪　瑞士 Tecan 仪器公司；CENTER-309 四通道温度计　台湾群特 CENTER。

1.2 实验方法

1.2.1　包冰衣熟制虾尾制备工艺　鲜活小龙虾（30±5 g），经过流动水的彻底清洗（10~15 min）、沥干、漂烫（5~7 min）以及手工去头、去虾线等精细工序，完成虾尾的前期处理，获得熟虾尾。随后，采用先进的包冰衣技术：将熟虾尾先用液氮进行急速冷冻（中心温度−18 ℃），然后迅速通过蒸馏水，使蒸馏水在虾尾表面迅速凝结成冰晶，此过程在低温环境中重复三次，确保虾尾被均匀且完整地包裹在一层薄薄的冰衣之中。最后，对包冰衣虾尾进行抽真空包装（抽真空时间 8~12 s，加热时间 3 s），并继续在−18 ℃ 的低温条件下保存，以确保其品质和口感。

1.2.2　感官评定　邀请 10 名专业感官评估员，将包冰衣的熟制虾尾通过流水解冻、手工剥壳，随后擦干

表面水分并沥干 5 min，得到虾仁，对虾仁进行感官评估。参考 Li 等[8] 对熟制小龙虾肉的评分标准，并略有修改。评估指标包括外观、咀嚼度、滋味和气味 4 个方面，分数越高表示感官评价结果越好，综合评分 75 分以上综合表现为良好；75~55 分为综合表现一般；55 分以下为感官拒绝，即综合评价表现为差。感官评分标准如表 1 所示。

表 1　感官评分标准
Table 1　Standard for evaluation of sensory

指标	0~8	9~17	18~25
外观	虾肉碎散、色泽暗红	虾肉较完整、色泽发暗	虾肉完整、色泽鲜红
咀嚼度	肉质软烂、口感差	肉质弹性一般、嚼劲一般	肉质紧密有嚼劲、有弹性
滋味	滋味一般、咸味较重	滋味较好、鲜咸适中	滋味鲜美、鲜咸适中
气味	无香气，有腥味	香气良好，无异味	香气好，无异味

1.2.3　质构（TPA）　参考王子凌等[9] 的测定方法，取小龙虾虾尾的第二、三两节，使用 TA.XT 2i/50 质构仪对样品的 TPA 进行测定，探头型号 P/36R，测试参数设定：测前速度 2.0 mm/s，测试速度 1.0 mm/s，测后速度 2.0 mm/s，触发力 5.0 g，样品距探头距离 10.0 mm。

1.2.4　挥发性盐基氮（TVB-N）　根据 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》[10] 中的自动凯氏定氮仪法略作调整进行测定。

样品前处理：称 3 g 虾肉于 50 mL 离心管中，加入 30 mL 蒸馏水，浸泡 30 min 后过滤，滤液为待测液放入 4 ℃ 备用。蒸馏：将盛有 10 mL 硼酸吸收液（20 g/L，添加指示剂溴甲酚绿：甲基红=5∶1）的 50 mL 试管置于冷凝管下端，并使其插入液面以下，前后取 5 mL MgO（10 g/L）溶液和试样滤液于蒸汽反应室内，迅速盖上活塞并用蒸馏水进行液封，蒸馏吸收至 50 mL 时，停止。滴定：用 0.01 mol/L 的 HCl 溶液（用无水 Na_2CO_3 标准滴定）进行滴定，终点为紫红色，同时用蒸馏水替代待测液体作为空白。并按下式计算：

$$X=\frac{(V_1-V_2)\times C\times 14}{M\times 5/30}\times 100$$

式中：X 为试样中挥发性盐基氮含量，mg/100 g；V_1 为测定样液消耗的盐酸体积，mL；V_2 为测定空白消耗的盐酸体积，mL；C 为滴定使用的 HCl 溶液浓度，mol/L；M 为样品质量，g。

1.2.5　硫代巴比妥酸值（TBARS）　参照 GB 5009.181-2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》[11] 中的硫代巴比妥酸比色法略作调整进行测定。称取 5 g 虾肉（混样）置于圆底烧瓶中，并加入 1 mL 盐酸溶液（$m_{HCl}:m_{H_2O}$=1∶2）、1 mL 液体石蜡与 10 mL 蒸馏水，利用水蒸气蒸馏，于冷凝管底端收集 50 mL 蒸馏液，待测。分别取 4 mL 蒸馏液与 TBA 乙酸溶液（现用现配，0.2883 g 硫代巴比妥酸溶解于 100 mL 90% 乙酸）于 10 mL 试管中充分混合，100 ℃ 水浴加热 50 min，快速冷却至室温，测定 535 nm 处吸光值 A，其中蒸馏水替代蒸馏液为空白。

TBARS值(mg/kg) = A×7.8

1.2.6　pH 测定　参照 GB 5009.237−2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》[12]。将样品解冻后，取 2 g 虾肉，并将其加入至 20 mL 蒸馏水中，然后 2000 r/min 均质 1 min，静置 3 min，上清液用 pH 计测定样品的 pH。

1.2.7　羰基含量　根据南京建成生物工程研究所总羰基含量测定试剂盒说明书，按步骤测定羰基含量。

1.2.8　活性巯基含量　参照石钢鹏等[13] 测定活性巯基的方法，在 412 nm 处测定吸光值，根据以下公式进行计算。

$$X=\frac{A\times D}{\varepsilon\times C_0}$$

式中：X 为样品中活性巯基摩尔浓度含量，μmol/mg；C_0 为肌原纤维蛋白质浓度，mg/mL；A 为试样在 412 nm 处的吸光值；D 为稀释倍数；ε 为摩尔消光系数，13600 L/(mol·cm)。

1.3　数据处理

本文数据的统计分析利用 Microsoft Excel 2021 软件统计，Origin 2024 软件进行作图。利用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素 Duncan 方差分析和 P 显著性分析，P<0.05 认为差异有统计学意义。所有实验均作平行检测 3 次以上，结果以平均数±标准方差表示。

2　结果与分析

2.1　感官评定

感官评价是一种广泛应用于食品品质分析的方法，主要用于反映消费者对产品的接受程度。该方法通过评价者对食品的颜色、风味、香气、质地等感官特性进行综合评分，从而快速判断食品的适口性和整体品质。为确保评价结果的客观性和可靠性，通常需要至少 10 名以上经过培训的评价员同时参与评分，以减少个体偏好带来的偏差。由图 1 可知，在冻藏期间小龙虾虾仁保持外观完整性，但随着贮藏时间的变化，小龙虾虾仁膜的颜色由亮红色逐渐变为暗红色，小龙虾虾肉的颜色逐渐失去透明光泽。表 2 数据显示，−18 ℃ 冷冻贮藏期间，小龙虾虾肉外观、滋味与气味变化显著（P<0.05），除咀嚼度评分外，其他指标评分均随贮藏时间延长显著下降（P<0.05）。贮藏时间 3 个月内的小龙虾虾肉综合评分保留了新鲜样品的 80%，贮藏时间 5 个月内的小龙虾虾肉综合评分保留了新鲜样品的 70%，而贮藏时间超过 6 个月后，虽仍可继续食用，但虾肉品质有所下降。综上认为，包冰衣小龙虾贮藏 3 个月时，达到赏味期[14]。吴晨燕等[15] 将鲜活小龙虾（16~17 g）加工成熟制麻

辣小龙虾，并研究其在−18 ℃ 冻藏条件下的品质变化，分析表明小龙虾在 4 个月之内能保持较好的感官品质，综合评分均保持在冻藏初始值的 70% 以上。通过冰衣层物理隔绝氧气、降低了产品的劣变程度，同时也有一定的保水作用，维持虾肉的组织状态，极度保持虾肉的品质和口感。

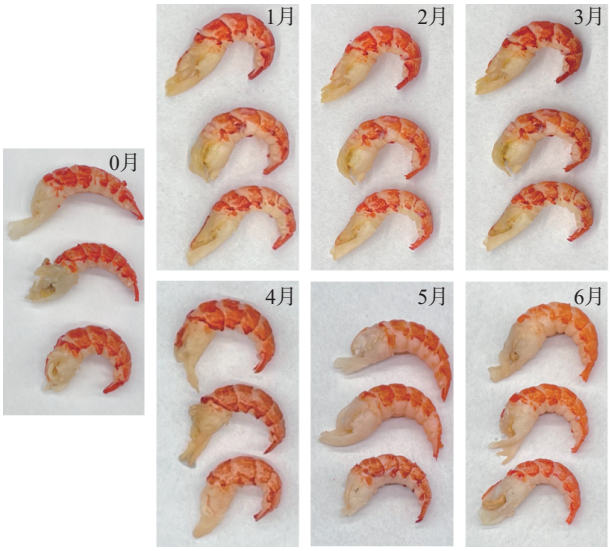


图 1 包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间外观

Fig.1 Changes in appearance value of cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

表 2 包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间感官评分

Table 2 Changes in ensory score value of cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

贮藏时间(月)	外观评分	咀嚼度评分	滋味评分	气味评分	综合评分
0	24.0±0.7^{d}	23.5±1.1^{f}	22.6±1.3^{f}	23.4±1.0^{f}	93.6±2.6^{g}
1	22.0±1.7^{c}	17.4±1.1^{cd}	21.3±1.8^{e}	21.7±1.0^{e}	82.6±2.7^{f}
2	21.5±1.9^{c}	16.6±0.8^{b}	19.5±1.0^{d}	21.3±1.4^{de}	78.8±2.0^{e}
3	20.1±0.8^{b}	18.0±0.7^{d}	18.0±1.1^{c}	20.6±1.3^{d}	76.6±2.3^{d}
4	18.2±0.8^{a}	19.5±1.0^{e}	16.5±1.1^{b}	18.7±0.8^{c}	72.8±2.2^{c}
5	17.8±0.9^{a}	16.9±1.2^{bc}	16.1±1.0^{b}	17.0±1.0^{b}	67.7±1.2^{b}
6	17.5±0.8^{a}	15.2±0.6^{a}	15.0±1.1^{a}	15.6±1.0^{a}	63.1±1.5^{a}

注：同列不同的字母表示数据间存在显著差异(P<0.05)，表3同。

2.2 质构变化（TPA）

质构能够直观地反映水产制品的品质特性[9]，以弹性与硬度为核心决定因素，咀嚼性、胶黏性通过二者协同作用体现[16]，而回复性则与弹性呈拮抗关系。小龙虾虾肉在−18 ℃ 贮藏条件下的质构特性 TPA 如表 3 所示。随贮藏时间的延长，虾肉的质构整体呈波动变化趋势，弹性、硬度、咀嚼性和胶黏性波动下降，而回复性值在 30 左右波动。冷冻贮藏过程中，肌肉结构变化受速冻温度和贮藏时间影响。在速冻过程中，在虾肉中形成了细小冰晶，初期使其内聚力增大，硬度有所提高；但随着贮藏时间的延长，冰晶体积逐渐增大，导致肌纤维结构可能受到损伤，Z 线和 M 线发生扭曲甚至断裂，使得小龙虾肉的硬度降低[17]，同时肌肉纤维可能会因蛋白质降解而松弛，从而降低虾肉恢复先前弹性的能力[18]。其中，各指标在贮藏第 3 个月或第 4 个月时均出现明显上升或下降，表明在贮藏 3~4 个月时虾仁的肌肉结构发生了较大变化。

2.3 总挥发性盐基氮（TVB-N）

TVB-N 含量是衡量水产制品在贮藏过程中蛋白质分解水平的有效指标，可用于评估水产新鲜度。由图 2 可知，新鲜熟制小龙虾虾肉的 TVB-N 值为 6.80 mg/100 g，在冻藏 6 个月期间，TVB-N 含量总体上呈显著上升趋势(P<0.05)，在第 6 个月时升高至 15.19 mg/100 g，远低于 GB 10136-2015《食品安全国家标准动物性水产品》规定的 30 mg/100 g 限值。冷冻贮藏初期小龙虾虾尾的 TVB-N 含量较低，可能是漂烫起到了杀菌钝酶效果，但随着贮藏期间的延长，蛋白质及其他含氮化物在内源酶等的作用下被降解、氧化，导致 TVB-N 值升高、新鲜度逐渐降低[19]。石钢鹏等[13] 对不同预处理方式的克氏原螯虾肉进行 −18 ℃ 冷冻贮藏，超高压处理组在贮藏第 6 个月时达到 17.14 mg/100 g，而热烫组前两个月的 TVB-N 值升高无显著差异(P>0.05)且数值较低，与本研究趋势一致，进一步说明漂烫预处理工艺有利于保持虾肉的新鲜度。而 Abdelnaby 等[5] 发现添加 4% γ-聚谷氨酸的小龙虾在−20 ℃ 冷冻贮藏 2 个月后，TVB-N 含量已超过 15 mg/100 g，而包冰衣小龙虾在−18 ℃ 冷冻贮藏 6 个月时，TVB-N 含量才超过 15 mg/100 g，表明包冰衣技术在食品表面形成的物理屏障，能更有效隔绝外界侵害，延缓蛋白质降解，保持产品品质。

2.4 TBARS

水产制品在冻藏过程中脂质容易发生氧化，导致其品质下降。TBARS 值是广泛应用于检测水产制品脂质过氧化程度的指标[20−21]。主要通过脂质过氧化产物丙二醛(MDA)与硫代巴比妥酸(TBA)反应

表 3 包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间 TPA 的变化

Table 3 Changes in TPA cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

贮藏时间(月)	弹性(mm)	硬度(g)	咀嚼性	回复性	胶黏性
0	62.10±0.02^{b}	2891.98±55.11^{e}	1114.52±22.63^{g}	30.59±1.33^{d}	1825.56±10.33^{e}
1	65.95±0.91^{d}	2403.19±47.87^{c}	834.41±8.83^{d}	25.03±0.73^{b}	1133.61±50.23^{a}
2	61.73±0.31^{b}	2467.02±43.43^{cd}	771.92±6.58^{c}	27.92±0.72^{c}	1252.36±24.68^{b}
3	61.31±0.79^{b}	3680.48±26.46^{f}	996.11±46.65^{e}	27.71±0.32^{c}	1425.29±24.46^{c}
4	63.46±0.58^{c}	1993.44±70.89^{a}	1043.33±23.43^{f}	22.89±0.46^{a}	1690.90±27.13^{d}
5	61.64±0.81^{b}	2528.40±47.24^{d}	698.80±7.98^{b}	32.64±0.12^{e}	1128.13±17.54^{a}
6	58.53±0.52^{a}	2255.68±31.70^{b}	681.23±17.12^{a}	31.49±0.28^{d}	1441.14±43.97^{c}

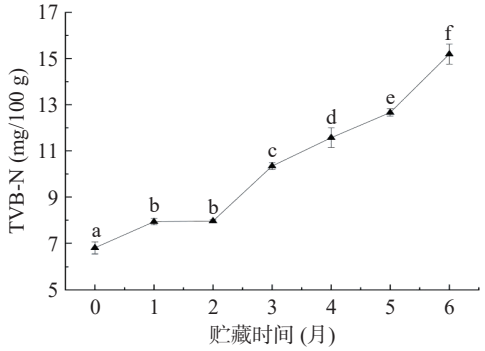


图 2　包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间 TVB-N 值的变化

Fig.2　Changes in TVB-N of cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

注：不同字母表示数据间存在显著差异（P<0.05），图 3~图 6 同。

形成 MDA-TBA 加合物的吸光度进行评估[22]。由图 3 可知，随着冷冻贮藏时间的延长，小龙虾虾尾的 TBARS 值逐渐升高（P<0.05），这与公方朔[23] 的报道一致。特别是在贮藏前 4 个月 TBARS 值由 0.25 mg/kg 上升至 1.41 mg/kg，表明在冷冻前期小龙虾虾尾中脂肪氧化剧烈。在冻藏前期，小龙虾肌肉中的冰晶发生快速生长及重结晶[24]，破坏细胞结构，导致溶酶体和线粒体酶的释放，而且冷冻诱导的溶质浓度增加，可以在未冻结的水分中创造一个高度氧化的环境，脂质自氧化速率加快[23,25]。在贮藏后期，MDA 的降解代谢速率与脂质过氧化持续生成速率趋于稳态时[26]，蛋白质的氧化交联作用在一定程度上减少了游离的 MDA 含量[27]，这使得 TBARS 值的增长趋势也变得平缓（P>0.05）。目前尚无统一标准明确规定水产制品中 TBARS 的安全限值，但有研究报道，TBARS 含量在 1.00~2.20 mg/kg 时，将产生不同程度的酸味和风味[24,28]，而本研究在贮藏 6 个月后包冰衣小龙虾的 TBARS 达最高值 1.59 mg/kg，但外观上无明显劣变，这可能是与原料特性和加工工艺相关。

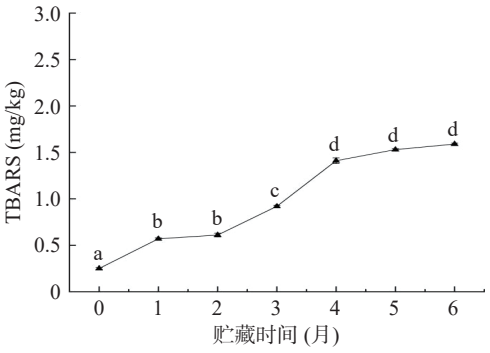


图 3　包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间 TBARS 值的变化

Fig.3　Changes in thiobarbituric acid values (TBARS) of cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

2.5　pH

pH 变化是由蛋白质分解、脂质氧化等多种因素引起，通常用于评估水产品的新鲜度[29]。包冰衣熟制小龙虾虾尾在冻藏期间 pH 变化如图 4 所示，pH 整体呈现先下降后上升的趋势，但整个贮藏过程中差异不明显。贮藏前期，由于脂质氧化（图 3）和糖酵解反应，虾肉中产生了游离脂肪酸、乳酸和磷酸等酸性物质[30−31]，并且冰晶破坏细胞结构，释放内容物，导致酸性物质积累，pH 轻微降低。而随着贮藏时间的延长，蛋白质分解产生的碱性物质逐渐增多[13]。酸碱性物质的共同作用，使得小龙虾肉在贮藏过程中 pH 变化较小。

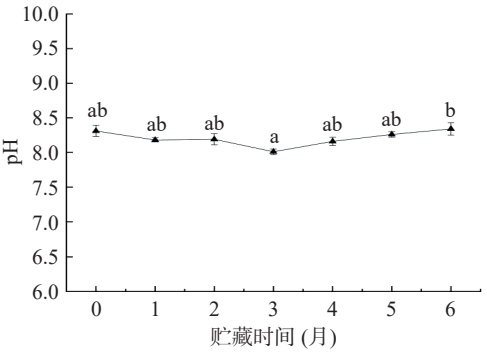


图 4　包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间 pH 的变化

Fig.4　Changes in pH of cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

2.6　羰基含量变化

蛋白质羰基化是蛋白质在氧化过程中的一种变性形式，是评价蛋白质氧化程度的重要指标[32]。如图 5 所示，在整个冷冻贮藏期间，羰基含量呈显著上升趋势（P<0.05），新鲜虾肉样品的羰基含量为 13.10 nmol/g，而在冷冻贮藏末期，羰基含量上升了 12 倍（170.56 nmol/g）。随着冻藏时间的延长，细胞间和细胞内的冰晶逐渐增大，破坏了细胞结构，导致细胞内促氧化物质释放以及蛋白质暴露面积增加，从而逐渐加剧了蛋白质羰基化[5]。同时，在持续的冰晶机械损伤作用下，冷冻贮藏过程中氨基酸侧链（NH 和 NH_2）发生氧化等变化，形成羰基化合物[5,29] 并不断累积，加速了蛋白质氧化。此外，脂质氧化生成的次级产物（如 MDA）通过形成席夫碱加成物等方式，进一步促进了蛋白质氧化[33]。

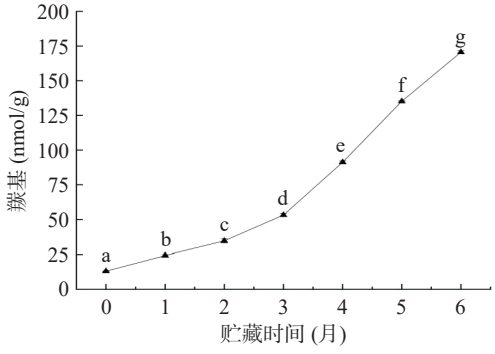


图 5　包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃ 冻藏期间羰基的变化

Fig.5　Changes in carbonyl gcotent of cooked crayfish tails with ice-coating during −18 ℃ frozen storage

2.7 活性巯基含量变化

巯基(-SH)是蛋白质的关键活性官能团之一，对维持蛋白质结构和功能稳定性具有重要作用，易氧化形成二硫键(-S-S-)[29]。如图 6 所示，在冻藏−18 ℃条件下，前 3 个月虾肉的活性巯基含量呈显著上升趋势(P<0.05)，第 4 个月达到最高值 14.01 μmol/mg，然后逐渐降低(P<0.05)。这与 Makri[34] 研究的金头鲷在−22 ℃贮藏期间巯基含量变化趋势一致。在贮藏过程中，低温导致蛋白质的三维立体结构发生变化，使包埋于蛋白质内部的巯基基团暴露，因而活性巯基含量上升；而随着贮藏时间延长，氨基酸侧链的巯基基团被氧化成二硫键和其他含硫基团，因此巯基含量逐渐减少[35]。

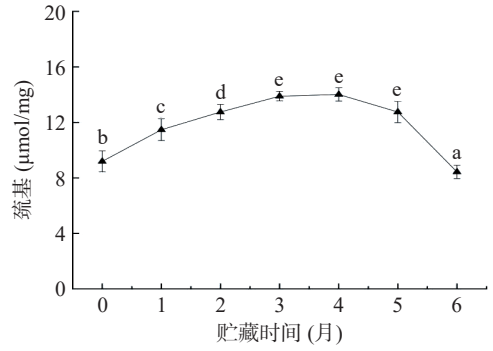


图 6 包冰衣熟制小龙虾虾尾−18 ℃冻藏期间活性巯基的变化

Fig.6 Changes in active sulfhydryl groups of crayfish tails cooked with ice coating during −18 ℃ frozen storage

2.8 相关性分析

小龙虾虾尾在贮藏−18 ℃环境下，对其弹性、硬度、TVB-N、TBARS、pH、羰基、活性巯基和感官评分进行 Pearson 相关分析。如图 7 所示，TVB-N 值与 TBARS、羰基含量呈极显著正相关(P<0.01)，感官评分与 TVB-N、TBARS 和羰基含量呈极显著负相关(P<0.01)，表明在冻藏过程中，蛋白质氧化和脂质氧化相互促进[36]，导致小龙虾虾尾新鲜度下降，进而降低虾尾感官评分。pH 与活性巯基含量呈显著负相关(P<0.05)，表明在贮藏后期蛋白质开始降解后，暴露出的活性巯基开始加速氧化，品质劣变加剧。此外，小龙虾虾肉的质构特性(弹性、硬度)与 TVB-N、TBARS、pH、羰基呈现不同程度的负相关(P>0.05)，表明质构特性下降受新鲜度下降、蛋白质和脂质氧化影响[36−37]。

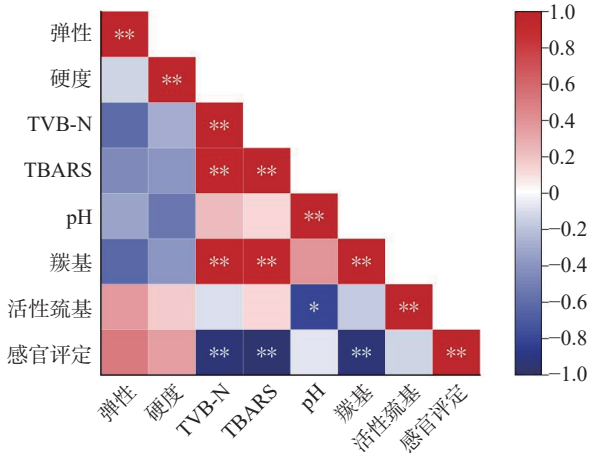


图 7 相关性分析

Fig.7 Correlation analysis

注：对包冰衣熟制虾尾中弹性、硬度、TVB-N、TBARS、pH、羰基、活性巯基和感官评分的 Pearson 相关分析(*P<0.05，**P<0.01)。

3 结论

在−18 ℃的冷冻过程中，包冰衣熟制小龙虾虾尾的贮藏品质逐渐发生变化。随贮藏时间延长，羰基、TVB-N 和 TBARS 呈显著上升趋势，硬度和弹性波动下降，感官评分逐渐下降。在贮藏 3 个月时，硬度和活性巯基取得较高值，综合评分仍保留了新鲜样品 80% 水平，表明包冰衣虾尾保持了良好的食用品质，而贮藏时间超过 3 个月后，品质进一步下降，但仍在国家规定的安全范围内。相关性结果表明，TVB-N 值、TBARS 与羰基含量呈极显著正相关，而感官评分与以上三个指标呈负相关，说明脂肪氧化、蛋白质变性是影响包冰衣熟制小龙虾虾尾贮藏品质的主要因素。本研究结果为监测包冰衣熟制小龙虾虾尾在冷冻贮藏过程中品质变化提供参考依据。未来可通过优化冰衣配方(如添加抗氧化剂或持水剂)、升级冻结工艺(如梯度降温)、稳定冻藏环境(智能温控与超低温技术)以及联合气调包装等多技术手段，协同提升冰衣长效保鲜性能，推动工业化冻藏品质调控体系的构建。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 中国水产学会全国水产技术推广总站. 中国小龙虾产业发展报告(2024)[J]. 中国水产, 2024, 584(7): 14−20. [National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China crayfish industry development report (2024)[J]. China Fisheries, 2024, 584(7): 14−20.]

[2] 江艳华, 林才云, 朱文嘉, 等. 不同冰衣量对冻虾品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(16): 4375−4380. [JIANG Yanhua, LIN Caiyun, ZHU Wenjia, et al. Effects of different ice glaze content on the quality of frozen shrimp[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(16): 4375−4380.]

[3] SHI Liu, XIONG Guangquan, DING Anzi, et al. Effects of freezing temperature and frozen storage on the biochemical and physical properties of *Procambarus clarkii*[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 91: 223−229.

[4] LI Hailan, LIU Qi, FU Jianlong, et al. Changes in the muscle quality of crayfish (*Procambarus clarkii*) under low-temperature storage[J]. LWT, 2025, 215: 117296.

[5] ABDELNABY T, LI Z J, CAO W X, et al. The effect of gamma-poly glutamic acid as a cryoprotectant on crayfish physicochemi-

cal and texture properties during frozen storage[J]. LWT, 2023, 184: 114905.
[6] 杨海琦, 陈季旺, 徐言, 等. 冻结及冻藏温度对小龙虾品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 189−198. [YANG Haiqi, CHEN Jiwang, XU Yan, et al. Effect of frozen and freezing storage temperatures on the quality of red swamp crawfish[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 189−198.]
[7] ZHANG R Y, REALINI C E, KIM Y H B, et al. Challenges and processing strategies to produce high quality frozen meat[J]. Meat Science, 2023, 205: 109311.
[8] LI Jinlin, ZHANG Quan, PENG Bin, et al. Exploration on the quality changes and flavour characteristics of freshwater crayfish (*Procambarus clarkia*) during steaming and boiling[J]. LWT, 2023, 190: 115582.
[9] 王子凌, 张子豪, 曾璐瑶, 等. 不同卤制加工阶段中食盐添加量对小龙虾尾品质及挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 52−60. [WANG Ziling, ZHANG Zihao, ZENG Luyao, et al. Effect of salt addition at different processing stages on the quality and volatile flavor components of marinated crayfish tails[J]. Food Science, 2024, 45(11): 52−60.]
[10] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.228-2016 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.228-2016 National food safety standard Determination of volatile base nitrogen in foods[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.]
[11] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.181-2016 食品中丙二醛的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.181-2016 National food safety standard Determination of malondialdehyde in food[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.]
[12] 国家卫生和计划生育委员会 GB 5009.237-2016 食品 pH 值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.237-2016 National food safety standard Determination of pH value of foods[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2016.]
[13] 石钢鹏, 周俊鹏, 章蔚, 等. 超高压与热烫预处理对克氏原螯虾肉冻藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 288−296,322. [SHI Gangpeng, ZHOU Junpeng, ZHANG Wei, et al. Effect of ultra-high pressure and blanching pretreatment on the quality of frozen *Procambarus clarkii* meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 288−296,322.]
[14] 施祁燕, 王锡昌, 史嘉男. 熟制中华绒螯蟹在冻藏过程中的品质变化[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(5): 793−800. [SHI Qiyan, WANG Xichang, SHI Jianan. Quality changes of cooked *Eriocheir sinensis* during frozen storage[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(5): 793−800.]
[15] 吴晨燕, 王晓艳, 王洋, 等. 熟制麻辣小龙虾冷藏和冻藏条件下的品质变化[J]. 肉类研究, 2018, 32(5): 52−56. [WU Chenyan, WANG Xiaoyan, WANG Yang, et al. Quality change of cooked spicy crayfish during refrigerated and frozen storage[J]. Meat Research, 2018, 32(5): 52−56.]
[16] 黄晓岚. 热加工与贮藏中虾黄对小龙虾品质的影响及脂质组分析[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024. [HUANG Xiaolan. Effects of thermal processing and storage on crayfish quality influenced by hepatopancreas and lipidomic analysis[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2024.]
[17] 刘嘉琪, 王慧平, 张鑫, 等. 原料肉冻藏品质劣变机制及其改善策略[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 321−330. [LIU Jiaqi, WANG Huiping, ZHANG Xin, et al. Deterioration mechanism of and improvement strategies for frozen meat[J]. Food Science, 2024, 45(8): 321−330.]
[18] MA Yunhao, WANG Ying, WANG Zhaoming, et al. Mechanism of textural properties changes of cooked chicken in early postmortem: Effect of protein degradation induced by calpain on heating shrinkage[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135901.
[19] 于晓慧, 庞一帆, 王梦阳, 等. 壳聚糖-海藻纳米纤维素协同强化海藻酸钠薄膜的制备及其在南美白对虾冷藏保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 243−255. [YU Xiaohui, PANG Yifan, WANG Mengyang, et al. Development of chitosan-seaweed nanocellulose enhanced alginate packaging film for the refrigerated preservation of the *Litopenaeus vannamei*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 243−255.]
[20] 孔金花, 温丽敏, 诸永志, 等. 不同加工方式对熟制克氏原螯虾冷藏期间品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 371−380. [KONG Jinhua, WEN Limin, ZHU Yongzhi, et al. Effects of different processing methods on the quality of cooked *Procambarus clarkii* during refrigerated storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 371−380.]
[21] ZHANG Zhen, XIA Guanghui, YANG Qiang, et al. Effects of chitosan-based coatings on storage quality of Chinese shrimp[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(12): 4085−4094.
[22] 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.
[23] 公方朔. 熟制小龙虾食用安全性研究及工艺控制[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [GONG Fangshuo. Study on the eating safety of cooked crayfish (*Procambarus clarkii*) and its process control[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
[24] TAN Mingtang, MEI Jun, XIE Jing, et al. 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.
[25] LEE S, JO K, JEONG H G, et al. Freezing-induced denaturation of myofibrillar proteins in frozen meat[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(5): 1385−1402.
[26] 桑燕菲, 杨立, 钱鑫萍, 等. 小龙虾冻藏期间的品质变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 243−252. [SANG Yanfei, YANG Li, QIAN Xinping, et al. Changes in the quality of crayfish meat during frozen storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 243−252.]
[27] LU Yingshuang, ZHUANG Yuan, JIANG Yu, et al. Impact of lipid oxidation products on the digestibility and structural integrity of myofibrillar proteins during thermal processing[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141397.
[28] 邹小欠, 杜传来, 王忻宇, 等. 不同腌制工艺对臭鳜鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 28−35. [ZOU Xiaoqian, DU Chuanlai, WANG Xinyu, et al. Effects of different curing methods on the quality of stinky mandarin fish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 28−35.]
[29] ABDELNABY T, FENG T Y, ZHANG T T, et al. Impact of frozen storage on physicochemical parameters and quality changes

in cooked crayfish[J]. Heliyon, 2024, 10(11): e31649.
[30] ÖZTURAN S, ÜNAL ŞENGÖR G F. Effects of cooking methods on the quality and safety of crayfish (*Astacus leptodactylus* Eschscholtz, 1823) during chilled storage[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(10): e16887.
[31] 张锦雯. 冷冻熟制小龙虾加工过程微生物消长规律及品质影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHANG Jinwen. The growth and decline of microorganisms and the influence on quality of frozen cooked crayfish during processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[32] XU Wenya, MA Qianyun, SUN Jianfeng, et al. Changes in quality characteristics of shrimp (*Penaeus chinensis*) during refrigerated storage and their correlation with protein degradation[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 114: 104773.
[33] CHIMENTI M S, KHANGULOV V S, ROBINSON A C, et al. Structural reorganization triggered by charging of Lys residues in the hydrophobic interior of a protein[J]. Structure, 2012, 20(6): 1071−1085.
[34] MARIA M. Full length research paper biochemical and textural properties of frozen stored (−22 ℃) gilthead seabream (*Sparus aurata*) fillets[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(7): 1287−1299.
[35] 石钢鹏, 阙凤, 高天麒, 等. 速冻方式对冷冻贮藏中大口黑鲈鱼肉蛋白质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 309−319. [SHI Gangpeng, QUE Feng, GAO Tianqi, et al. Effects of different quick-freezing methods on protein properties of large-mouth bass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 309−319.]
[36] 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 Gangpeng, GAO Tianqi, QIAN Xiaoqing, et al. Effects of different quick-freezing treatments on the quality changes of large-mouth bass meat during frozen storage[J]. Meat Research, 2020, 34(12): 68−74.]
[37] HAN Jiping, SUN Yingjie, SUN Rongxue, et al. Effects of freeze-thaw cycles on physicochemical properties and structure of cooked crayfish (*Procambarus clarkii*)[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2022, 4(1): 25.