

不同冻藏状态下南美白对虾品质与微观结构的变化

屈彤彤¹, 赵金红², 李仙仙¹, 黄笑非¹, 唐选明¹, 王霁昀³, 梁静娜³

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193) (2. 北京食品科学研究院, 北京 100068)

(3. 青岛海尔智能技术研发有限公司, 山东青岛 266000)

摘要: 本文研究了不同冻藏状态, 即玻璃态 ($T < T_g$, 特征玻璃化转变温度): $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 部分冻结浓缩态 ($T_g < T < T_m$, 特征冻结终点温度): $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 橡胶态 ($T > T_m$): $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冻藏6个月, 对南美白对虾品质与微观结构的影响。结果表明 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (玻璃态) 冻藏下南美白对虾的色差 (ΔE 值)、汁液流失率、挥发性盐基氮 (TVB-N) 含量、以及 pH 值最小, 分别为 5.33、4.80%、15.35 mg N/100 g 以及 7.22; 硬度、弹性和咀嚼性、SPP 含量和感官评分最高, 分别为 652.86%, 65.76% 和 184.90、80.04 mg/g 和 7.40, 显著优于部分冻结浓缩态以及橡胶态下冻藏的南美白对虾 ($p < 0.05$), 并且 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏下南美白对虾组织中的冰晶比其他条件尺寸较小、分布更均匀。而 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仅在 pH 值无显著差异 ($p > 0.05$), $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下南美白对虾品质最差。随着冻藏时间延长, 即使在玻璃态下虾的品质也仍在变化, 但与其他状态相比, 玻璃态下南美白对虾的品质下降最缓慢。本文表明, 玻璃态冻藏能有效抑制南美白对虾冻藏过程中的品质劣变, 较好地保持冷冻虾的品质。

关键词: 南美白对虾; 冻藏品质; 冻藏状态; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2020)10-147-156

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.10.1171

Quality and Microstructure Changes of *Penaeus vannamei* under Freezing States

QU Tong-tong¹, ZHAO Jin-hong², LI Xian-xian¹, HUANG Xiao-fei¹, TANG Xuan-ming¹, WANG Ji-yun³,
LIANG Jing-na³

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

(2. Beijing Academy of Food Sciences, Beijing 100068, China)

(3. Qingdao Haier Smart Technology R&D Co. Ltd, Qingdao 266000, China)

Abstract: To investigate the effects of three freezing state: glass state ($T < T_g$, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), partially frozen concentrated state ($T_g < T < T_m$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), rubber state ($T > T_m$, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), on the quality and microstructure of *Penaeus vannamei* meat, the microstructure, color, drip loss, total volatile base-Nitrogen (TVB-N), pH, texture, salt soluble proteins (SSP) and sensory score were detected during six months storage. The results showed that samples frozen at glassy state had the lowest values of color (5.33), drip loss (4.80%), total volatile base-Nitrogen (TVB-N) (15.35 mg N/100 g), pH (7.22); the highest values of hardness (652.86%), springiness (65.76%) and chewiness (184.90), salt soluble proteins (SSP) (80.04 mg/g) and sensory score (7.4). In addition, the microstructure of *Penaeus vannamei* meat at $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ was better than partial-freeze-concentrated and rubbery states. There was no significant difference in texture, drip loss and pH value ($p > 0.05$), but color, SSP and sensory scores were found to have significant difference ($p > 0.05$) between frozen at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Furthermore, the samples frozen at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ was significantly better than those frozen at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p < 0.05$), and the samples frozen at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rubber state) had the worst quality. It

引文格式:

屈彤彤, 赵金红, 李仙仙, 等. 不同冻藏状态下南美白对虾品质与微观结构的变化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 147-156

QU Tong-tong, ZHAO Jin-hong, LI Xian-xian, et al. Quality and microstructure changes of *Penaeus vannamei* under freezing states [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 147-156

收稿日期: 2019-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31501546)

作者简介: 屈彤彤 (1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏

通讯作者: 唐选明 (1963-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏

indicated that glassy state storage can effectively inhibit the deterioration of the quality of *Penaeus vannamei* and improve the quality of *Penaeus vannamei*.

Key words: *Penaeus vannamei*; frozen quality; freezing states; microstructure

南美白对虾(*Penaeus vannamei*), 又名凡纳滨对虾, 含有丰富的蛋白质、大量的微量元素及人体必需氨基酸, 是兼具营养价值与经济价值的水产品^[1]。但由于其高水分、高蛋白以及大量的高活性多酚氧化酶, 使得南美白对虾在贮藏过程中很容易受到自身微生物与外界微生物的污染, 从而导致腐败变质; 同时虾体内的多酚氧化酶也将催化酪氨酸等物质, 产生一系列的生物化学反应, 导致虾体出现黑斑^[2,3]。微生物和酶是引起食品变质的主要原因, 冻藏可以有效抑制微生物生长繁殖和酶的活性^[4], 但是由于传统冻藏技术形成的冰晶较大, 仍然会导致食品发生品质劣变的现象。因此引入玻璃态冻藏技术来提高南美白对虾的冻藏品质, 这对于虾的冷冻保藏具有重要意义。

在冷冻过程中, 随着冰晶的不断析出, 非冻结相中溶液浓度不断提高, 冰点逐渐降低, 最后达到最大冻结浓缩状态, 溶液中的剩余水分不再结晶, 最终形成玻璃态。根据玻璃化转变的概念, 当食品贮藏在玻璃态时(低于玻璃化转变温度)被认为是非常稳定的, 因为在高黏度下分子移动性大大降低, 从而分子受扩散控制的各种化学反应速率大大减小, 因此在玻璃化转变温度以下时可以有效抑制食品品质的劣变^[5,6]。对于含水率较高的食品, 其冰晶的形成与玻璃化转变是一个复杂的过程。它的稳定性可由最大冻结浓缩条件下的特征玻璃化转变温度(T_g)和特征冻结终点温度(T_m)来确定, 其中, T_g 和 T_m 可以从食品的状态图中得到^[7-9]。根据 Shi 等^[10]对南美白对虾玻璃化转变温度和状态图的研究, 得到其 T_g 为 $-74.90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以及 T_m 为 $-32.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从而得知当南美白对虾在 T_g 以下冻藏时, 虾体系的基质由冰晶和玻璃体组成, T_g 被认为是含水率较高的食品(冷冻食品)长期冻藏的安全温度^[6]。此外, 当食品贮藏在 T_m 以下时, 在最大冻结浓缩条件下所有可以冻结的水都转变为冰晶。而当贮藏温度大于 T_m 时, 食品体系存在未冻结水, 其冻结基质的黏度较小^[11]。此时, 由于体系中分子移动性的增加, 导致冷冻食品重结晶速率以及其他品质降解反应速率大大增加, 因此 T_m 不适宜作为冷冻食品长期贮藏温度^[12,13]。近年来, 玻璃态冻藏技术成为食品贮藏的热点技术之一。据报道, 牛肉糜在 T_g 以上温度冻藏与 T_g 以下温度冻藏 6 个月后, 其挥发性盐基氮有显著差异, 且随着贮藏时间的延长, 其含量均显著增加^[14]。张瑜^[15]通过研究发现芒果在不同特征温度下(T_g , T_g'

和 T_m) 冻藏 6 个月后, 相比部分冻结浓缩态与橡胶态, 玻璃态冻藏下能够更好地保持芒果的色泽、硬度、维生素 C 含量和抗氧化活性, 有效抑制冻结水含量和冰晶尺寸的增加。目前国内外对于全虾的研究多集中于化学涂层^[1,2]以及脂质、蛋白变性的研究^[16,17], 对于不同冻藏状态下(玻璃态、部分冻结浓缩态和橡胶态)全虾的理化品质指标及微观结构变化的研究未见报道。

因此, 本文将南美白对虾冻藏于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T < T_g$; 玻璃态)、 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T < T_g < T_m$; 部分冻结浓缩态)、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_g < T < T_m$; 部分冻结浓缩态)以及 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T > T_m$; 橡胶态), 研究这三种冻藏状态对南美白对虾品质(色泽、质构、汁液流失率、挥发性盐基氮、盐溶蛋白、pH 值和感官评分)以及微观结构的影响, 通过对虾微观结构的研究, 揭示虾在不同状态冻藏过程中品质变化的原因。本文的结果以期对虾的冷冻加工提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

南美白对虾购自北京市四道口水产市场, 选取鲜活、虾体长度 $(14.70 \pm 0.54)\text{ cm}$, 质量 $(21.25 \pm 1.03)\text{ g}$ 的虾, 30 min 内运输到实验室, 冰水致死。

实验所用试剂: 氧化镁、轻质氧化镁、KCl、 NaH_2PO_4 、 Na_2HPO_4 、无水乙醇、正丁醇、甲苯、乙醇溶液等购自国药集团化学试剂有限公司; BCA 试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司; Carnoy 溶液、亮蓝水溶液购自北京中科万邦生物科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

CR-400 美能达色度计, 日本柯尼卡美能达控股公司; TA-XT2i 物性质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; GL-20G-II 高速冷冻离心机, 上海安亭科学仪器厂; Multiskan FC 型酶标仪, 赛默飞世尔(上海)仪器有限公司; 均质机, 上海昂尼仪器仪表有限公司; pH 计, 梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司; WS-T11LPR0 低温温度记录仪, 杭州微松环境科技有限公司; DW-86W100 卧式超低温保存箱, 青岛海尔特种电器有限公司, 等。

1.3 试验方法

1.3.1 样品准备

南美白对虾全虾(不去头、不去皮),完整冻藏,迅速分组,将其分成37袋,每袋30只,分别放置于自封袋中,第一组用于鲜样测定,剩下36袋随机分成四组,直接放置于 -80°C (超低温, $T < T_g'$)、 -60°C ($T_g' < T < T_m'$)、 -40°C ($T_g' < T < T_m'$)和 -18°C ($T > T_m'$)下,每2个月取出样品,将低温温度记录仪探头插入样品中心,静水解冻到样品中心温度 0°C 为止,然后再对样品进行各项指标测定。其中,根据Shi等^[10]的报道,南美白对虾在最大冻结浓缩条件下的 T_g' 为 -74.9°C 和 T_m' 为 -32.3°C 。

1.3.2 肌肉组织显微结构检测

参考李侠等^[18]的方法,对南美白对虾虾体组织采用Carnoy溶液固定,经过酒精脱水,二甲苯透明,石蜡包埋,样品切片于载玻片上,经蒸馏水复水之后用质量分数为0.40%的亮蓝水溶液染色,最后用无水乙醇脱水处理,加封固剂和盖玻片封藏,待显微分析。

1.3.3 色泽

取去头、去壳南美白对虾第二腹节处1 cm长样品,使用色差仪在反射模式下,以标准白板校准,测定新鲜和解冻样品的色泽,选取样品切面进行测量,得到 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值,其中, L^* 为明度指数, $L^*=0$ 表示黑色, $L^*=100$ 表示白色; a^* 、 b^* 为色品指数; $+a^*$ 方向表示红色增加, $-a^*$ 方向表示绿色增加; $+b^*$ 方向表示黄色增加, $-b^*$ 方向表示蓝色增加。由以下公式(1)计算 ΔE ^[19]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (1)$$

式中, L_0 、 a_0 和 b_0 是新鲜样品的测定值, L^* 、 a^* 和 b^* 是试验样品的测定值。

1.3.4 质构

采用TA-XT2i物性质构仪测定样品硬度(Hardness),弹性(Springiness),咀嚼度(chewiness),

其中硬度值是以其物性曲线最高峰值来表示。样品选取去头、去壳虾体的第二腹节处1.5 cm长,进行测试。使用平底柱形头p/6(6 mm直径)模拟人牙齿咀嚼食物模式,对样品进行2次压缩质构仪质地多面剖析(TPA)测试。测试条件如下:测试前速率3 mm/s,测试速率1 mm/s,测试后速率1 mm/s,压缩程度50%,停留间隔时间5 s,负重探头类型为Auto-5 g,数据收集200 pps(Point Per second),每次测10个样品,每个样品测1次,取平均值^[20]。

1.3.5 汁液流失率

分别取出冷冻样品3组,称重后室温静水解冻,待样品中心温度达到 0°C 时为止,然后用滤纸拭去样品表面的汁液,2 min后滤纸吸干水分,再称重样品质量,计算汁液流失率^[21]。

$$\text{汁液流失率}/\% = \frac{\text{解冻前重} - \text{解冻后重}}{\text{解冻前重}} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.6 挥发性盐基氮(TVB-N)含量

参照张宁等^[22]的方法,稍作修改。测量步骤如下:取1 g虾肉糜于消化管中,再加入0.20 g轻质氧化镁,混合均匀,用凯氏定氮仪测量,以每100 g样品中挥发性盐基氮毫克数计(mg N/100 g)。

1.3.7 盐溶性蛋白含量(SSP)的测定

参考李里特等的方法^[23],取2 g绞碎的虾肉,加入20 mL低离子磷酸缓冲溶液(0.025 mol/L NaH_2PO_4 -0.025 mol/L Na_2HPO_4)进行搅拌(匀浆),离心(8000 r/min, 10 min),倒掉上清液,再加入20 mL高离子磷酸缓冲溶液(0.5 mol/L KCl -0.01 mol/L NaH_2PO_4 -0.03 mol/L Na_2HPO_4)匀浆,使蛋白溶解,最后使用BCA试剂盒测定蛋白含量,以每克样品中盐溶性蛋白毫克数计(mg/g)。

1.3.8 pH值

参考Fan等^[24]的方法,稍作修改。取5 g虾肉糜,加入45 mL蒸馏水进行匀浆,离心后取上清液,以pH计测定其值。

1.3.9 感官评价

表1 虾的感官评定表

Table 1 Sensory assessment of *Penaeus vannamei*

指标	一级鲜度(8~10分)	二级鲜度(5~7分)	不宜食用(5分以下)
滋味	鲜味浓	鲜味较浓	鲜味不明显
气味	香味浓	香味较浓	香味不明显
外观	虾壳呈鲜艳的红色	壳关节尾部轻微黑斑	体表出现大面积黑斑
弹性	富有弹性	弹性较好	弹性稍差

在贮藏期间,选取5位经过专业培训的人员组成评定小组,对虾品质进行评分(标准见表1)。每克虾加5 mL的水,不加任何调味料,沸水煮熟10 min。

不同冻藏温度的虾按照滋味、气味、外观与组织弹性进行感官品质评定,采用加权平均法。检验方法:取适量样品于白色瓷盘上,在自然光下观察色泽、状态,

嗅其气味^[25]。

1.3.10 数据处理

采用 SPSS 22.0 统计软件对数据进行 Duncan 方法分析, 差异显著水平 $p < 0.05$; 运用 Origin 8.0 作图。实验结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 不同温度冻藏过程中肌肉组织微观形态的变化

图 1 为新鲜南美白对虾以及在不同温度下冻藏 6 个月后虾肌肉纤维冰晶显微图。新鲜虾的肌肉组织切片中肌原纤维之间紧密连接, 几乎没有空隙。在玻璃态 ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下虾的肌肉组织切片中冰晶较小且分布均匀, 对虾肉组织结构破坏程度较小, 使得肌肉组织之间的间隙小, 肌肉纤维清晰、紧密、结构完整最为接近新鲜样品的结构。在部分冻结浓缩态 ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 由图可见肌肉组织之间的间隔相对变大, 肌肉组织分布相对均匀, 但与 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比其纤维条纹变得粗大, 肌肉组织中存在较大的空隙, 表明部分冻结浓缩态下形成了较大的冰晶。虽然都处于部分冻结浓缩态, 但与 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下虾的肌肉组织更为紧密, 且组织之间空隙较小, 纤维条纹较细。而在橡胶态 ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 虾肉体系的黏度较低, 水分子移动性增强, 冻藏过程中容易发生重结晶现象, 从而冰晶尺寸较大且分布不均匀, 少部分冰晶已连接成块。这导致冰晶对肌原纤维破坏较严重, 造成肌肉组织结

构松散, 纹理模糊, 从而导致橡胶态下南美白对虾的品质较差。这与刘会省等^[26]研究不同冻结方式对南极磷虾组织切片的影响结果相似。不同温度冻藏过程中肌肉组织微观形态差异显著, 结果表明玻璃态下 ($< -74.6\text{ }^{\circ}\text{C}$) 虾肉组织结构破坏程度最小, 而同时应尽量避免将虾放置于橡胶态 ($> -32.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下冻藏。

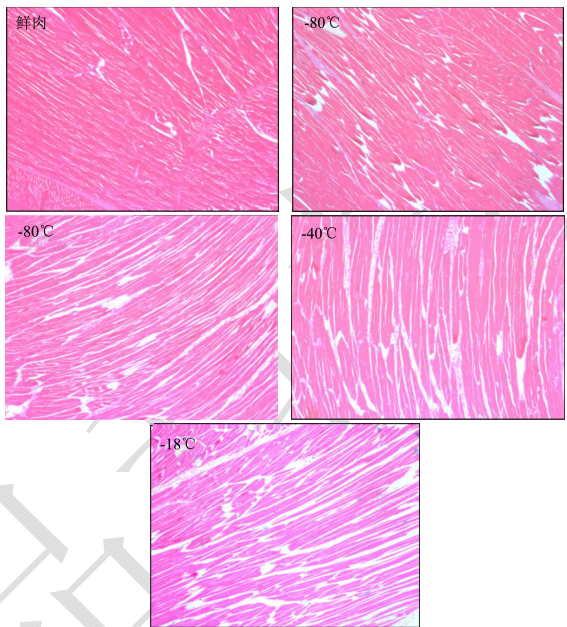


图 1 新鲜南美白对虾肉(纵切面)和在不同温度下冻藏 6 个月后南美白对虾(纵切面)肌纤维冰晶显微图(放大倍数 $40\times$)

Fig.1 Micrograph of *Penaeus vannamei* (profile) muscle fibers and ice crystals formed of and after 6 months

2.2 不同温度冻藏过程中色泽的变化

表 2 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾总色差的影响

Table 2 Effect of different freezing states on total color difference of *Penaeus vannamei* during frozen storage

指标	温度/ $^{\circ}\text{C}$	0 个月	2 个月	4 个月	6 个月
ΔE	-80	1.13 ± 0.42	$2.93\pm 0.63^{\text{Bb}}$	$5.63\pm 0.93^{\text{Ab}}$	$5.33\pm 0.83^{\text{Ac}}$
	-60	1.13 ± 0.42	$3.00\pm 0.50^{\text{Cb}}$	$5.07\pm 0.32^{\text{Bb}}$	$5.55\pm 0.56^{\text{Ac}}$
	-40	1.13 ± 0.42	$4.07\pm 0.53^{\text{Bb}}$	$7.38\pm 0.84^{\text{Aa}}$	$6.91\pm 0.94^{\text{Ab}}$
	-18	1.13 ± 0.42	$7.05\pm 0.92^{\text{Ba}}$	$8.57\pm 0.91^{\text{Aa}}$	$9.05\pm 0.50^{\text{Aa}}$

注: 不同小写字母 (a-c) 表示同一列之间有显著性差异 ($p < 0.05$), 不同大写字母 (A-C) 表示同一行之间有显著性差异 ($p < 0.05$)。

表 2 是虾在不同温度冻藏过程中总色差 (ΔE) 的变化, 由表可以看出, 在冻藏 6 个月后, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (橡胶态) 贮藏下虾的 ΔE 值显著大于部分冻结浓缩态和玻璃态 ($p < 0.05$)。这是因为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (橡胶态) 下虾肉易导致冰晶生长, 破坏虾的肌细胞, 可能会促使多酚氧化酶与多巴胺物质反应, 造成虾体色泽逐渐变黑或变红^[12,27]。当贮藏第 6 个月时, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的虾肉比 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下虾肉的 ΔE 值下降 41.10%, 这是因为玻璃态下系统相对稳定不易发生化学反应, 因此色差变化最小。其

中, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下虾肉都处于部分冻结浓缩态, 当冻藏到 4 个月和 6 个月时, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 ΔE 值比 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 ΔE 值显著降低了 31.30%、19.68% ($p < 0.05$)。这可能是因为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 比 T_m 低更多, 虾肉体系分子扩散速率相对较小, 能抑制水分重结晶的发生, 减小对虾肉细胞结构的破坏程度, 降低对虾体色泽的影响。这与汪兰等人的研究结果相似, 即 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下贮藏的鲈鱼色泽变化最稳定, 品质越好^[28]。然而, 即使在玻璃态 ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, ΔE 也仍旧发生变化 (表

2), 这表明在玻璃态下扩散控制反应没有完全停止, 冷冻虾可能发生了焓松弛现象, 使非平衡的玻璃态在贮藏过程中会自发地向平衡的结晶态转变, 导致一部分非冻结水转变为冰晶^[13,29], 从而使得虾肉即使在玻璃态下色泽也随时间延长而变化。

2.3 不同温度冻藏过程中质构的变化

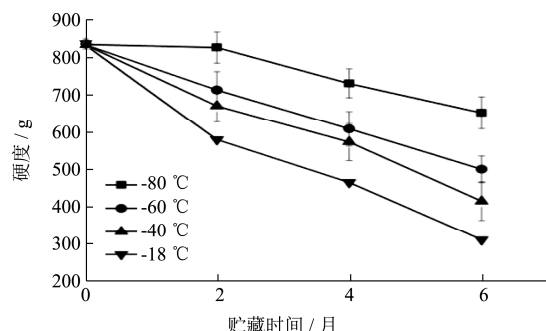


图2 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾硬度的影响

Fig.2 Effect of different freezing states on hardness of *Penaeus vannamei* during frozen storage

如图2所示, 新鲜南美白对虾的硬度值是 835.30 g, 随着冻藏时间的延长, 四个冻藏温度下虾肉的硬度值均出现显著下降 ($p < 0.05$)。在冻藏第4个月时, 与新鲜虾肉相比, 玻璃态 (-80 °C)、部分冻结浓缩态 (-60 °C与-40 °C) 和橡胶态 (-18 °C) 虾肉的硬度值分别下降了 12.50%、27.10%、31.30%和 44.30%。这是因为-80 °C下虾肉处于玻璃态, 体系黏度很大 ($10^{12} \sim 10^{14}$ Pa·s)^[12], 不容易发生重结晶现象, 形成的均匀细小的冰晶对肌原纤维破坏程度较小 (见图2), 硬度值较大^[11,30]。当冻藏较短时 (前4个月) 时, -60 °C和-40 °C之间的硬度值无显著差异 ($p > 0.05$); 而当贮藏到6个月时, -60 °C下虾肉的硬度值 (500.47 g) 显著大于-40 °C条件 (414.70 g, $p < 0.05$)。这说明随着冻藏时间的延长, -60 °C下虾肉的硬度值降低的较小。其结果与于丽霞等人研究保持一致^[31]。

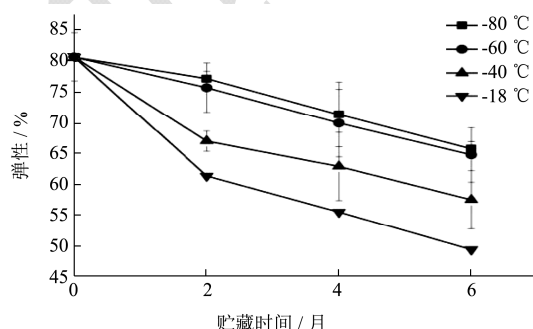


图3 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾弹性的影响

Fig.3 Effect of different freezing states on springiness of *Penaeus vannamei* during frozen storage

如图3所示, 新鲜南美白对虾的弹性为 80.60%,

随着冻藏时间的延长, 虾肉的弹性均显著下降 ($p < 0.05$), 这可能是由于肌肉蛋白在冻藏过程中发生变性, 导致肌肉间结合力下降。当贮藏 6 个月时, -60 °C、-40 °C和-18 °C下弹性值依次为 64.77%、57.46%和 49.35%, 而-80 °C贮藏下弹性为 65.76%, 与其它贮藏温度相比分别增加了 0.99%、8.3%和 16.41%。结果表明橡胶态 (-18 °C) 下虾肉的弹性最小, 这是因为橡胶态下形成较大的冰晶, 减弱了肌肉结缔组织之间的机械强度, 汁液流失较大, 使得微生物以及酶的反应速率较快, 造成虾肉的弹性减小 ($p < 0.05$)。而玻璃态 (-80 °C) 下, 微生物和酶的作用较小且蛋白冷冻变性程度更小^[31], 从而虾的弹性值较大。其中, 尽管-60 °C和-40 °C都处于部分冻结浓缩态, 但是-60 °C下虾的弹性值比-40 °C条件下要大 ($p < 0.05$), 这可能是因为-60 °C比 T_m 低更多, 体系相对更稳定, 形成细小的冰晶对虾肉细胞组织的损失较小。江杨阳研究发现贮藏温度越低, 能更大程度上抑制微生物的增长和内源酶的作用, 保持小龙虾肌肉的完整性^[32]。

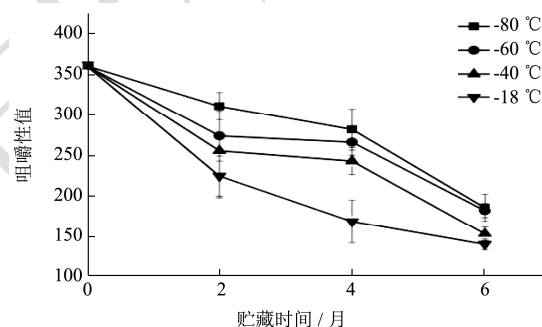


图4 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾咀嚼性的影响

Fig.4 Effect of different freezing states on chewiness of *Penaeus vannamei* during frozen storage

如图4所示, -80 °C下南美白对虾的咀嚼性值较大, 其次是部分冻结浓缩态 (-60 °C和-40 °C), -18 °C橡胶态下咀嚼性值最小 ($p < 0.05$)。其中, -60 °C与-40 °C都处于部分冻结浓缩态下, 在冻藏第2个月和第4个月时两个冻藏温度下虾的咀嚼性值之间无显著差异 ($p > 0.05$), 而当冻藏到6个月时, -60 °C下虾的咀嚼性值显著大于-40 °C条件 ($p < 0.05$), 这与南美白对虾的硬度和弹性值的趋势相似。南美白对虾咀嚼性值在所有温度下都随冻藏时间的延长而逐渐减小 ($p < 0.05$), 贮藏到第6个月时, -80 °C、-60 °C、-40 °C和-18 °C下咀嚼性值分别达 184.90、181.46、152.35 和 139.15, 与鲜样相比咀嚼性值分别下降了 48.75%、49.70%、57.77%和 61.43%。咀嚼性降低可能是肌肉硬度降低、肌肉弹性减少等综合作用的效果, 其中, 玻璃态下南美白对虾的咀嚼性值下降的最缓慢。

Boonsumrej 等对斑节对虾也得到了相似的结论,即在不同冻藏温度贮藏,冻藏温度越低,虾肉质构和细胞微观结构保持的越好^[33]。

2.4 不同温度冻藏过程中汁液流失率的变化

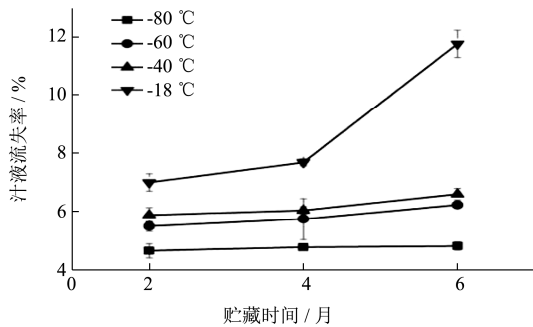


图5 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾汁液流失率的影响

Fig.5 Effect of different freezing states on drip loss of *Penaeus vannamei* during frozen storage

南美白对虾汁液流失率随冻藏时间的变化如图 5 所示,在 6 个月冻藏期间,三种冻藏状态之间虾的汁液流失率逐渐增大且均有显著差异 ($p<0.05$),这说明不同的冻藏状态对南美白对虾的汁液流失率有显著影响。冻藏 6 个月后-18 °C 下汁液流失率最大,为 11.77%,这是因为-18 °C 下虾肉处于橡胶态,该体系的分子移动性较大,较小的温度变化都会影响冰晶的大小和分布,从而加剧对肌肉组织结构的破坏,导致汁液流失率更大^[34]。与-18 °C 相比,部分冻结浓缩态 (-60 °C 和-40 °C) 和玻璃态下 (-80 °C) 虾的汁液流失率分别降低 4.50%、5.55%、59.20%。此外,随着冻藏时间的延长,-80 °C 下虾肉的汁液流失率无显著变化 ($p>0.05$),而在其它贮藏温度条件下汁液流失率冻藏 6 个月后比冻藏 2 个月后显著增大 ($p<0.05$),这是因为玻璃态下形成的冰晶小,降低了对细胞膜的破坏,从而降低了解冻损失。这与石径的研究结果一致,即降低冻藏温度能够显著减少虾在贮藏过程中的汁液流失^[35]。

2.5 不同温度冻藏过程中挥发性盐基氮的变化

根据 GB 2733-2015《食品安全国家标准鲜、冻动物性水产品》的规定,TVB-N 限量值为 30 mgN/100 g。南美白对虾在不同温度下冻藏过程中 TVB-N 值的变化如图 6 所示,新鲜南美白对虾的 TVB-N 值为 5.85 ± 0.05 mgN/100 g,与方艺达等^[36]报道的新鲜南美白对虾的含量 (5.99 mg/100 g) 接近。随冻藏时间延长所有样品的 TVB-N 值都逐渐增大 ($p<0.05$),这与俞所银等人的研究结果相似^[37]。当贮藏 6 个月时,与玻璃态 (-80 °C) 相比,部分冻结浓缩态 (-60 °C 和-40 °C) 下,虾肉的 TVB-N 值分别增加了 23.50%和 79.30%,橡胶态 (-18 °C) 下虾肉的 TVB-N 值增加了 108.90%。这是由于玻璃态下体系黏度较大,分子移动性大大减小,不容易发生扩散控制反应,蛋白质分子稳定,从而抑制小分子胺类形成,TVB-N 值较小。此外,尽管-60 °C 与-40 °C 均处于部分冻结浓缩态,但在整个冻藏过程中-60 °C 下虾肉的 TVB-N 值显著小于-40 °C 下 ($p<0.05$),这可能是因为冻藏温度 (-60 °C) 越接近 T_g ,体系中发生扩散控制反应的速率越低,虾腐败变质的速度越慢。在整个冻藏期间,玻璃态下虾肉 TVB-N 值的增加程度最缓慢,表明玻璃态下贮藏可以明显延长虾的保鲜期。这与李杰的研究结果相似,将南极磷虾在不同的温度 (-18 °C、-25 °C、-30 °C 和-50 °C) 冻藏,其 TVBN 含量差别明显,且冻藏温度越低 TVBN 含量越低^[38]。

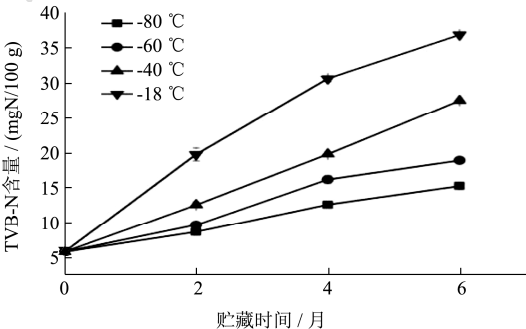


图6 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾 TVB-N 的影响

Fig.6 Effect of different freezing states on TVB-N of *Penaeus vannamei* during frozen storage

2.6 不同温度冻藏过程中 pH 值的变化

表 3 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾 pH 值的影响

Table 3 Effect of different freezing states on pH of *Penaeus vannamei* during frozen storage

指标	温度/°C	0 个月	2 个月	4 个月	6 个月
pH	-80	6.95±0.18 ^{Ba}	7.11±0.08 ^{ABc}	7.20±0.01 ^{Ac}	7.22±0.04 ^{Ac}
	-60	6.95±0.18 ^{Ba}	7.21±0.04 ^{Bbc}	7.26±0.01 ^{Ab}	7.36±0.02 ^{Ab}
	-40	6.95±0.18 ^{Ba}	7.22±0.06 ^{Ab}	7.30±0.05 ^{Ab}	7.41±0.02 ^{Ab}
	-18	6.95±0.18 ^{Ca}	7.45±0.02 ^{Ba}	7.57±0.03 ^{ABa}	7.69±0.05 ^{Aa}

注:不同小写字母(a-c)表示同一列之间有显著性差异 ($p<0.05$),不同大写字母(A-C)表示同一行之间有显著性差异 ($p<0.05$),

下同。

如表 3 所示,新鲜的南美白对虾的 pH 值为 6.95,随着冻藏时间的延长,南美白对虾在不同温度下的 pH 值有增大的趋势。当贮藏 6 个月时, -18℃ 下虾的 pH 最大(与新鲜样品相比增加了 10.65%),这是因为虾肉处于橡胶态(-18℃)时,较大的分子移动性造成冰晶重结晶,产生较大的内压,使得肌原纤维断裂变形(见 2.1),促使蛋白质变性被分解为小分子胺类使得 pH 值较大^[3],同时长期冻藏过程中在微生物滋生以及在内源酶的作用下,蛋白质被分解成碱性物质,最终导致 pH 值增大^[39]。而玻璃态(-80℃)下体系较为稳定,能够较好的保持肌原纤维蛋白结构, pH 值变化最小(与新鲜样品相比增加了 3.88%)。虾肉 pH 值的变化规律与 TVB-N 值相似。-60℃ 和 -40℃ (部分冻结浓缩态)下样品 pH 值比 -18℃ 下要小。此外, -60℃ 与 -40℃ 冻藏下虾肉的 pH 值之间无显著差异 ($p>0.05$)。这表明玻璃态冻藏能抑制南美白对虾 pH 值的变化。

2.7 不同温度冻藏过程中盐溶性蛋白的变化

新鲜南美白对虾的 SSP 含量为 106.30 mg/g,随着冻藏时间延长,所有冻藏条件下南美白对虾的 SSP 含量都有下降的趋势。在冻藏 6 个月后,玻璃态(-80℃)、部分冻结浓缩态(-60℃与-40℃)和橡胶态(-18℃)冻藏下 SSP 含量分别为 80.04 mg/g、73.81 mg/g、59.41 mg/g 和 49.24 mg/g,与新鲜虾肉相比,依次降低 24.70%, 30.60%、44.10%和 53.70%,这表明玻璃态下能抑制蛋白质变性,防止盐溶性蛋白的减小,这与石启龙等人的研究结论相符^[17]。此外,前人研究发现玻璃态(-80℃)下贮藏,可以抑制弱结合水转变成自由水^[40],抑制肌球蛋白因非共价键结合形

成不溶性聚集体^[41]。另外,玻璃态下冰晶分布均匀且尺寸较小(见 2.1),能有效抑制虾体肌原纤维断裂挤压变形,因此可能肌原纤维蛋白不容易发生变性^[3], SSP 值较高。其次,在 -80℃ 下可以有效抑制虾肉中微生物以及自身酶活性,从而抑制了蛋白质分解产生的小分子胺类物质。在部分冻结浓缩状态下,当贮藏第 6 个月时, -60℃ 下的 SSP 值含量是 -40℃ 条件下 SSP 含量的 1.24 倍,这是由于冻藏温度与虾肉 T_m 之间的差值(T_m-T)越大,对肌原纤维破坏越低。同时,虾肉体系内扩散控制反应速率会越低,从而蛋白质越稳定,因此 -60℃ 下 SSP 值比 -40℃ 下较大。李学英等研究得出南极磷虾在随着冻藏时间的增加 SSP 的含量逐渐减少,冻藏温度越低 SSP 降低减缓,在 -30℃ 冻藏条件下的南极磷虾的品质略好于 -20℃,而在 -40℃ 和 -50℃ 冻藏条件下的南极磷虾 SSP 含量相对较高,降低的相对缓慢^[42]。

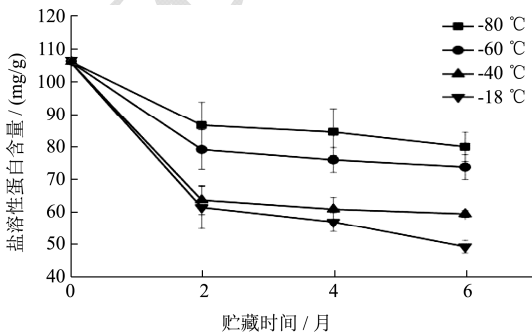


图 7 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾盐溶性蛋白含量的影响

Fig.7 Effect of different freezing states on salt soluble protein content of *Penaeus vannamei* during frozen storage

2.8 不同温度冻藏过程中感官评分的变化

表 4 在冻藏过程中不同冻藏状态对南美白对虾感官评分的影响

Table 4 Effect of different freezing states on sensory assessment of *Penaeus vannamei* during frozen storage

指标	温度/℃	0 个月	2 个月	4 个月	6 个月
感官评价 分值	-80	满分(10 分)	9.50±0.40 ^{Aa}	8.90±0.30 ^{Ba}	7.40±0.30 ^{Ca}
	-60		8.70±0.60 ^{Ab}	7.70±0.20 ^{Bb}	7.00±0.20 ^{Bb}
	-40		8.50±0.30 ^{Ab}	7.10±0.2 ^{Bb}	6.50±0.20 ^{Cc}
	-18		7.70±0.70 ^{Ac}	4.90±0.20 ^{Bc}	3.50±0.30 ^{Cd}

注:不同小写字母(a-c)表示同一列之间有显著性差异($p<0.05$),不同大写字母(A-C)表示同一行之间有显著性差异($p<0.05$)。

如表 4 所示,新鲜南美白对虾感官评分满分为 10 分,其色泽明亮,虾体为淡青色且颜色透亮,虾肉富有弹性,有虾肉特有的香味。随着冻藏时间的延长,虾体色泽与新鲜南美白对虾相差较多,虾肉硬度、弹性也有下降。-18℃ (橡胶态)冻藏 6 个月后南美白对虾与鲜样色差最大,汁液流失严重,煮沸过程中汤

汁浑浊、肉质松软,弹性较差,感官评分最低。然而在 -80℃ (玻璃态)下冻藏 6 个月后分值最高,可能是由于在玻璃态(-80℃)下,体系较稳定,蛋白质变性程度较小,同时色泽、质构、汁液流失率等指标较好。其中 -60℃ 和 -40℃ 下感官评分在前 4 个月冻藏时无显著差异 ($p<0.05$),但在冻藏 6 个月后 -60℃ 下

的感官评分比-40℃下较高($p<0.05$),这可能是因为随着冻藏时间延长,-60℃比-40℃条件下发生化学反应的程度更缓慢。

3 结论

与部分冻结浓缩态(-40℃和-60℃)和橡胶态(-18℃)相比,玻璃态(-80℃)下贮藏的南美白对虾能够保持较好的色泽和质构,汁液流失率、TVB-N值和pH最小,SSP含量和感官评分最高,品质较好。部分冻结浓缩态(-40℃和-60℃)状态下贮藏的南美对虾次之,橡胶态(-18℃)下冻藏虾品质最差。其中,在-40℃和-60℃下南美白对虾都处于部分冻结浓缩态,在冻藏前期(2个月或4个月)时,南美白对虾在色差、质构和感官评分方面-60℃与-40℃条件无显著差异,而当冻藏6个月后这些指标才有显著差异。冻藏6个月后,玻璃态(-80℃)下冰晶尺寸较小且分布均匀,肌原纤维更为致密,对肌肉组织破坏较小,肌肉组织更为接近新鲜样品。而在橡胶态(-18℃)下,冰晶挤压使得肌原纤维变形,对肌肉组织破坏较大。在部分冻结浓缩态下,与-40℃冻藏相比,-60℃下肌肉组织冰晶尺寸相对较小,肌原纤维更为紧密。这与上述南美白对虾的理化指标以及感官评分结果一致。随冻藏时间的延长,南美白对虾的品质均有下降趋势,即使在玻璃态下虾的品质也随时间延长而变化,这可能是发生了焯松弛现象,但与其他状态相比,玻璃态冻藏下可减缓虾类品质下降速度,延缓其腐败进程,从而延长产品的保质期。

参考文献

- [1] WANG Yan-bo, LIU Lin, ZHOU Jin-ru, et al. Effect of chitosan nanoparticle coatings on the quality changes of postharvest white leg shrimp, *Litopenaeus vannamei*, during storage at 4℃ [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 8(4): 907-915
- [2] YUAN Gao-feng, LV Hua, TANG Wen-yan, et al. Effect of chitosan coating combined with pomegranate peel extract on the quality of Pacific white shrimp during iced storage [J]. Food Control, 2016, 59: 818-823
- [3] MA Lu-kai, ZHANG Bin, DENG Shang-gui, et al. Comparison of the cryoprotective effects of trehalose, alginate, and its oligosaccharides on peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during frozen storage [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(3): C540-C546
- [4] 阙婷婷,刘文娟,陈士国,等.水产品低温保鲜技术研究现状[J].中国食品学报,2013,13(8):181-189
- QUE Ting-ting, LIU Wen-juan, CHEN Shi-guo. Research progress of low temperature preservation technology in aquatic products [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(8): 181-189
- [5] Rahman M S. Food stability beyond water activity and glass transition: macro-micro region concept in the state diagram [J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12: 726-740
- [6] Syamaladevi R M, Sablani S S, TANG Ju-ming, et al. Stability of anthocyanins in frozen and freeze-dried raspberries during long-term storage: in relation to glass transition [J]. Journal of Food Science, 2011, 76: 414-421
- [7] Guizani N, Al-Saidi G S, Rahman M S, et al. State diagram of dates: glass transition, freezing curve and maximal-freeze-concentration condition [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99: 92-97
- [8] ZHAO Jin-hong, LIU Fang, WEN Xin, et al. State diagram for freeze-dried mango: freezing curve, glass transition line and maximal-freeze-concentration condition [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 157: 49-56
- [9] Rahman M S. Applications of macro-micro region concept in the state diagram and critical temperature concepts in determining the food stability [J]. Food Chemistry, 2012, 132: 1679-1685
- [10] SHI Qi-long, LIN Wen-wen, ZHAO Ya, et al. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Penaeus vannamei* meat with and without maltodextrin addition [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2016, 25(8): 1348-1367
- [11] Sablani S S, Syamaladevi R M, Swanson B G. A review of methods, data and applications of state diagrams of food systems [J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2: 168-203
- [12] Syamaladevi R M, Manahiloh K N, Muhunthan B, et al. Understanding the influence of state/phase transitions on ice recrystallization in Atlantic salmon (*Salmo salar*) during frozen storage [J]. Food Biophysics, 2012, 7: 57-71
- [13] ZHAO Jin-hong, XIAO Hong-wei, Ding Yang, et al. Effect of osmotic dehydration pretreatment and glassy state storage on the quality attributes of frozen mangoes under long-term storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(6): 1527-1537
- [14] Ahmet Akköse, Nesimi Aktas. Determination of glass transition temperature of beef and effects of various cryoprotective agents on some chemical changes [J]. Meat Science, 2008, 80: 875-878

- [15] 张瑜. 芒果玻璃态冻藏过程中品质随水状态和冰晶变化规律的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017
ZHANG Yu. The research of changes in quality attributes with water state and ice crystals of mango during glassy state frozen storage [D]. Beijing: Chinese academy of Agricultural Sciences, 2017
- [16] Takeungwongtrakul S, Benjakul S, H-Kittikun A. Lipids from cephalothorax and hepatopancreas of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): compositions and deterioration as affected by iced storage [J]. Food Chemistry, 2012, 134: 2066-2074
- [17] 赵亚, 石启龙, 曹淑敏. 南美白对虾贮藏期间 Ca^{2+} -ATPase 活力变化规律与机制[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 258-264
ZHAO Ya, SHI Qi-long, CAO Shu-min. Variation and underlying mechanisms of Ca^{2+} -ATPase activity in *Penaeus vannamei* during storage [J]. Food Science, 2018, 39(5): 258-264
- [18] 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同隔距冻结-解冻对牛肉品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 278-285
LI Xia, QIAN Shu-yi, YANG Fang-wei, et al. Effects of different gauges under low voltage electrostatic field assisting thawing-freezing on beef quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 278-285
- [19] 赵金红. 渗透脱水-冻结与玻璃化贮藏对芒果品质的影响及动力学模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
ZHAO Jin-hong. Effect of osmo-dehydrofreezing and glassy state storage on the quality attributes of frozen mango and dynamic simulation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014
- [20] Cadun A, Schubring R, Cakli S. Comparison of retail marinated shrimp products available in German market according to physical parameters [J]. Journal of Animal and Veterinary Advances, 2009, 8: 2568-2570
- [21] ZENG Qing-zhu, Thorarinsdottir K A, Olafsdottir G. Quality changes of shrimp (*Pandalus borealis*) stored under different cooling condition [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(7): 459-466
- [22] 张宁, 谢晶, 李志鹏, 等. 冷藏物流过程中温度变化对三文鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(10): 186-190
ZHANG Ning, XIE Jing, LI Zhi-peng, et al. Effect of temperature variation on quality of salmon fillet in low temperature logistics [J]. 2015, 41(10): 186-190
- [23] 李里特, 罗永康. 水产食品安全标准化生产[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006
LI Li-te, LUO Yong-kang. Standardized Production of Aquatic Food Safety [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006
- [24] FAN Wen-jiao, SUN Jun-xiu, CHEN Yun-chuan, et al. Effects of chitosan coating on quality and shelf life of silver carp during frozen storage [J]. Food Chemistry, 2009, 115(1): 66-70
- [25] 江杨阳, 杨水兵, 余海霞. 不同冻结方式对红虾肌肉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(10): 142-148
JIANG Yang-yang, YANG Shui-bing, YU Hai-xia. Effects of different freezing methods on the quality of red shrimp [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(10): 142-148
- [26] 刘会省, 迟海, 杨宪时, 等. 冻结方式对南极磷虾品质的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(7): 1601-1605
LIU Hui-xing, CHI Hai, YANG Xian-shi, et al. Effects of freezing methods on the quality of Antarctic krill (*Euphausia Superba*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(7): 1601-1605
- [27] 蓝蔚青, 胡潇予, 阮东娜, 等. 流化冰处理对南美白对虾冰藏期间品质与水分迁移变化的影响[J]. 食品科学, 2018, 40(9): 256-263
LAN Wei-qing, HU Xiao-yu, RUAN Dong-na, et al. Effect of slurry ice on the quality and water mobility of pacific white shrimps (*Litopenaeus vannamei*) during storage [J]. Food Science, 2018, 40(9): 256-263
- [28] 汪兰, 曾俊杰, 吴文锦, 等. 不同冻藏温度对鲈鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 293-298
WANG Lan, ZENG Jun-jie, WU Wen-jin, et al. Effect of different frozen storage temperature on quality of perch [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 293-298
- [29] LIU Ye-ting, Bhandari B, ZHOU Wei-biao, et al. Glass transition and enthalpy relaxation of amorphous food saccharides: a review [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54: 5701-5717
- [30] 赵小余, 肖珊, 张铎, 等. 基围虾冻藏过程中的品质变化[J]. 大连工业大学学报, 2015, 34(2): 88-96
ZHAO Xiao-yu, XIAO Shan, ZHANG Duo, et al. The quality changes during *Metapenaeus ensis* freezing storage [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2015, 34(2): 88-96
- [31] 于丽霞, 姜启兴, 夏文水, 等. 冻藏温度对罗氏沼虾冻藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 197(3): 128-131
YU li-xia, JIANG qi-xing, XIA wen-shui, et al. Effects of

- different frozen temperature on the quality of freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) [J]. Food & Machinery, 2018, 197(3): 128-131
- [32] 江杨阳.小龙虾低温贮藏品质变化规律及其腐败菌鉴定[D].杭州:浙江大学,2019
- JIANG Yang-yang. Studies on the quality change of red swamp crayfish and its specific organisms during low temperature storage [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [33] Boonsumrej S, Chaiwanichsiri 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
- [34] 李立杰.南美白对虾贮藏时质构和色差的变化研究[D].天津:天津商业大学,2014
- LI li-jie. Study on texture and color of *Penaeus vannamei* Boone during storage [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2014
- [35] 石径.中华管鞭虾冻藏过程中品质变化规律及机理研究[D].北京:中国农业大学,2018
- SHI Jing. Studies on quality changes and mechanism of mud shrimp (*Solenocera melantho*) during frozen storage [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018
- [36] 方艺达,裘肖霞,常思盎,等.冷藏及冰藏条件下南美白对虾品质变化规律[J].肉类研究,2017,31(7):22-28
- FANG Yi-da, QIU Xiao-xia, CHANG Si-ang, et al. Quality changes of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during chilled and ice storage [J]. Meat Research, 2017, 31(7): 22-28
- [37] 俞所银,包建强,李越华,等.南极磷虾在不同冻藏条件下品质变化[J].食品与发酵工业,2014,40(1):232-237
- YU Suo-yin, BAO Jian-qiang, LI Yue-hua, et al. Quality changes of antarctic krill (*Euphausia superba*) stored at different frozen temperatures [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(1): 232-237
- [38] 李杰.冻藏南极磷虾品质变化及其动力学研究[D].上海:上海海洋大学,2013
- LI Jie. The research on the quality and dynamics of Antarctic krill during frozen storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013
- [39] 常耀光,李兆杰,薛长湖,等.超高压处理对南美白对虾在冷藏过程中贮藏特性的影响[J].农业工程学报,2008,24(12): 230-237
- CHANG Yao-guang, LI Zhao-jie, XUE Chang-hu, et al. Effects of ultra high pressure treatment on storage characteristics of white shrimp in cold storage [J]. 2008, 24(12): 230-237
- [40] ZHANG Yu, ZHAO Jin-hong, DING Yang, et al. Changes in the vitamin C content of mango with water state and ice crystals under state/phase transitions during frozen storage [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 222: 49-53
- [41] 李燕,方艺达,罗永康,等.冰衣对冷冻南美白对虾贮藏品质的影响[J].肉类研究,2018,32(5):39-44
- LI Yan, FANG Yi-da, LUO Yong-kang, et al. Effect of ice coating on the quality of frozen shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Meat Research, 2018, 32(5): 39-44
- [42] 李学英,刘会省,杨宪时,等.冻藏温度对南极磷虾品质变化的影响[J].现代食品科技,2014,30(6):191-195
- LI Xue-ying, LIU Hui-sheng, YANG Xian-shi, et al. Effects of temperature on the quality of Antarctic krill (*Euphausia superba*) during frozen storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(6): 191-195

(上接第 209 页)

- [41] Jongsutjarittam O, Charoenrein S. The effect of moisture content on physicochemical properties of extruded waxy and non-waxy rice flour [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 114: 133-140
- [42] 潘小卫.加酶挤压高粱酿造小曲白酒的研究[D].无锡:江南大学,2017
- PAN Xiao-wei. Study on enzymatic extrusion pretreatment of sorghum for xiaoqu liquor brewing [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017