

干制南美白对虾贮藏过程中肌原纤维蛋白氧化、滋味变化及其相关性

岳宜静^{1,2}, 臧明伍¹, 刘海杰², 成晓瑜^{1,*}, 赵欣¹, 王乐¹

1. 中国肉类食品综合研究中心 北京食品科学研究院 肉类加工技术北京市重点实验室, 北京

100068; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要:以干制南美白对虾为研究对象, 主要探究在加速贮藏条件下其肌原纤维蛋白氧化、滋味物质以及滋味的变化情况, 并¹进行相关性分析。结果表明, 在贮藏过程中干制南美白对虾的颜色逐渐变成暗褐色; 肌原纤维蛋白总巯基含量下降、羰基含量和疏水性上升, 肌原纤维蛋白氧化程度增加; 干制虾中甜菜碱、次黄苷酸(IMP)和呈鲜味游离氨基酸含量呈现出先上升后下降的趋势, 而甜味游离氨基酸、苦味游离氨基酸以及总游离氨基酸含量逐渐下降。通过电子舌表征干制南美白对虾滋味变化中发现, 其鲜味和甜味降低, 苦味增加, 咸味无明显变化($P>0.05$), 丰富度先增加后减小。对蛋白氧化和滋味指标进行相关性分析, 干制南美白对虾蛋白氧化程度与次黄嘌呤(Hx)含量以及电子舌表征的苦味呈正相关($P<0.05$), 与甜菜碱、IMP、游离氨基酸含量以及电子舌表征的鲜味、甜味、咸味和丰富度呈负相关($P<0.05$)。表明短期内贮藏的干制南美白对虾滋味变化差别不大, 但随贮藏时间的延长, 其外观色泽劣变、肌原纤维蛋白氧化加剧、滋味品质下降, 为调控南美白对虾贮藏品质提供了理论和数据依据。

关键词: 南美白对虾; 干制; 肌原纤维蛋白氧化; 滋味; 贮藏过程

Changes of myofibrillar protein oxidation and taste during storage of dried *Penaeus vannamei* and their correlation

YUE Yijing^{1,2}, Zang Mingwu¹, LIU Haijie², ZHAO Xin¹, CHENG Xiaoyu^{1,*}, WANG Le¹

(1. China Meat Research Center, Beijing Academy of Food Sciences, Beijing Key Laboratory of Meat Processing Technology, Beijing 100068, China;

2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, the changes of myofibrillar protein oxidation, flavor substance and flavor of dried *Penaeus vannamei* were investigated under accelerated storage, and the correlation analysis was carried out. As a result, the color of dried *Penaeus vannamei* gradually changed to dark brown, the content of total sulfhydryl group decreased, carbonyl group content and hydrophobicity increased, which indicated the degree of oxidation of myofibrillar protein increased. The contents of betaine, hypoxanthine acid (IMP) and fresh free amino acids in dried shrimp showed a trend of first increasing and then decreasing, while the contents of sweet free amino acids, bitter free amino acids and total free amino acids decreased gradually. The electronic tongue was used to characterize the taste change of dried *Penaeus vannamei*, which found that the taste and sweetness of dried *Penaeus vannamei* decreased, the bitterness increased, and the saltiness did not change significantly ($P>0.05$). The richness first increased and then decreased. The correlation analysis of protein oxidation and taste indexes showed that the degree of protein oxidation of dried *Penaeus vannamei* was positively correlated with Hypoxanthine (Hx) content and bitter taste ($P<0.05$), and negatively correlated with betaine, IMP, free amino acid content and umami, sweetness, saltiness

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2018YFD0901005)

第一作者简介: 岳宜静(1999—)(ORCID: 0000-0003-3825-0681), 女, 研究生, 研究方向为油脂氧化。E-mail: yueyijing0213@163.com

*通信作者简介: 成晓瑜(1972—)(ORCID: 0000-0002-2713-4872), 女, 教授级高级工程师, 硕士, 研究方向为肉类加工及副产物综合利用。E-mail: chxyey@aliyun.com

and richness ($P<0.05$). The results showed that there was no significant difference in the taste of dried white shrimp stored in the short term, but with the extension of storage time, the appearance and color of white shrimp deteriorated, the oxidation of myofibrillar protein increased, and the taste quality decreased, which provided theoretical and data basis for regulating the storage quality of white shrimp.

Keywords: *Penaeus vannamei*; dried technology; myofibrillar protein oxidation; taste; storage process

中图分类号: TS205.1

文献标志码: A

DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20221017-155

南美白对虾 (*Penaeus vannamei*), 又名凡纳滨对虾、白对虾, 是世界上最重要的经济虾类之一, 原产于美洲太平洋沿岸水域, 80 年代引入我国, 目前养殖产量居世界首位^[1]。南美白对虾肉质细腻有弹性、滋味鲜美, 富含蛋白质、多种维生素以及丰富的矿物质等营养物质, 深受消费者喜爱^[2]。

随着消费者对南美白对虾食用品质要求的提高, 在加工与贮藏过程中滋味的保持尤为重要。滋味是消费者对食物喜好判别的重要指标之一, 是一种经舌头上的味蕾传输到大脑的味觉信息, 一般认为至少有五种基本的味觉特征, 分别为甜、咸、鲜、酸、苦^[3]。舌头感知到虾的味觉特征通常由一些呈味的游离氨基酸、多肽、蛋白质、核苷酸等物质呈现, 研究者利用这些呈味物质指标评价滋味品质, 实现筛选加工工艺、提升产品品质的目的^[4]。Bai 等^[5]研究发现加热处理后虾中的游离氨基酸、核苷酸以及有机酸等呈味物质含量发生变化, 有利于虾形成独特的风味。而在烤制前进行煮沸、蒸煮或微波等预处理, 可以改善虾制品的整体色泽、增加鲜味氨基酸含量^[6]。热风微波联合干燥促进了南美白对虾中滋味的形成, 与鲜虾相比虽然干制后的南美白对虾部分核苷酸含量和游离氨基酸干基总量下降, 而干制虾的味精当量却高于鲜虾, 干制使南美白对虾的鲜味上升、滋味丰富度增加^[7]。

南美白对虾富含丰富的蛋白质, 在贮藏过程中极易受到环境的影响而发生蛋白氧化, 肌原纤维蛋白是肌肉蛋白的主要组成成分, 它的氧化引发的虾及制品品质的劣变逐渐受到关注。蛋白氧化既包括蛋白质大分子结合位点发生的氧化还原反应, 也包括多肽和游离氨基酸发生的氧化还原反应^[8]。即食日本沼虾贮藏过程中羰基含量和自由基含量在增加且质构在不断劣变^[9]; 南美白对虾在热风干制过程中蛋白的氧化变性显著降低了虾的硬度、胶粘性和咀嚼性等质地特性^[10]。目前关于蛋白氧化对虾品质的影响主要集中在虾肉质构上, 而对于滋味的研究较少。添加风味酶能够加速蛋白质降解, 增加草鱼发酵中的游离氨基酸和核苷酸含量, 进而增加草鱼的滋味和风味^[11]。虾在贮藏过程中蛋白质也会发生氧化降解, 因此推测贮藏过程中的蛋白质氧化也会对虾的滋味产生影响。

干制加工是南美白对虾主要加工方式之一, 不仅可以抑制微生物生长繁殖, 提高产品的安全性和货架期, 同时赋予虾独特的香气、鲜甜的滋味以及更加丰富的口感^[2], 不过干制加工产品在贮藏过程中也会发生品质的劣变。目前对于南美白对虾的研究多集中在不同加工方式对于其品质影响^[12]和生鲜南美白对虾贮藏过程中品质变化^[13], 但是对于干制后的南美白对虾在贮藏过程中的蛋白降解和氧化对滋味的研究却鲜有。本研究以干制南美白对虾为研究对象, 考察其在加速贮藏过程中蛋白氧化、降解及滋味的变化, 并分析其相关性, 以期在贮藏过程中基于蛋白氧化来改善干制南美白对虾滋味的防控技术提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

南美白对虾 (平均湿重: 30.5 ± 2.4 g、长 17-18cm), 同批次购买自北京北水食品工业有限公司, 冷冻储存。

无机试剂(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司, 乙醇、乙醚、丙酮(均为分析纯) 北京市通广精细化工公司, 甲醇(HPLC 级) 美国赛默飞世尔科技公司, 雷氏盐(纯度>93.0%) Solarbio, 甜菜碱标准品 坛墨质检-标准物质中心, 胞嘧啶核苷酸(CMP)、腺嘌呤核苷酸(AMP)、次黄苷酸(IMP)、鸟嘌呤核苷酸(GMP)、次黄嘌呤(Hx)标准品 上海源叶生物科技有限公司, R21256 双缩脲蛋白定量

试剂盒 上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

CM-700d 型色差仪 日本 KONICA MINOLTA 公司, AM-10 型匀浆机 日本 NIHONSEIKI KAISHA, iS10 FT-IR spectrometer 美国尼高力公司, FS5 荧光分光光度计 Edinburgh Instruments, Waters e2695 液相色谱仪(Waters 2998 紫外检测器) Waters 公司, L-8900 型氨基酸全自动分析仪 日本 HITACHI 公司, INSENT 味觉分析系统(电子舌) 日本 Intelligent Sensor Technology。

1.3 方法

1.3.1 干制南美白对虾制备方法和加速贮藏方法

将冷冻的南美白对虾在 4℃ 中解冻后, 放置于沸水中(虾:水=1:2), 沸腾后保持 3 分钟后将虾捞出, 冷却至室温后放入干燥箱(温度 60℃、湿度 30%)中进行 16h 干制。干燥后将样品进行密封包装并放入 37℃ 保藏箱中加速贮藏^[14], 分别在第 0、10、20、30、40 天拍照并取样。

1.3.2 干制南美白对虾色度测定

色度测定采用色差仪测定粉碎后混匀的样品^[15], 重复测定 15 次, 亮度 L^* 、红绿 a^* 、蓝黄 b^* 值。

总色差值 W 的计算为: $W = \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$

1.3.3 干制南美白对虾肌原纤维蛋白的提取方法

参考祁雪儿等^[10]的方法并稍作修改将虾去头、尾、壳, 虾肉经粉碎机粉碎, 以虾肉粉与 10mmol/L pH7.00 的 PBS 缓冲液(0.10mol/L NaCl)1:4(m/v)的比例混合, 匀浆 1min, 10000×g 冷冻离心 10min, 弃去上清液留下沉淀。将沉淀重复上述操作 3 次。将最后的沉淀加入相同体积的上述缓冲液, 匀浆 1min 后用 4 层纱布过滤, 取滤液于 10000×g 冷冻离心 10min, 所得沉淀即为肌原纤维蛋白。

1.3.4 干制南美白对虾肌原纤维蛋白浓度、总巯基、羰基和疏水性测定方法

将肌原纤维蛋白溶解于 20mmol/L pH7.0 的 PBS 缓冲液(0.60mol/L NaCl)中, 用双缩脲蛋白定量试剂盒测定溶液中蛋白质含量。干制南美白对虾的肌原纤维蛋白总巯基含量、羰基含量以及疏水性分别参考胡熠^[16]、赵冰^[17]、贾娜^[18]等人的方法进行测定。

1.3.5 干制南美白对虾肌原纤维蛋白傅里叶红外光谱与二级结构含量测定方法

将提取的肌原纤维蛋白冻干后, 在 FT-IR 光谱仪进行扫描测定。参考陈旭等^[19]的方法并对测定参数稍作修改, 范围 400-4000 cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} , 信噪比是 50000:1, 光谱记录了 64 次扫描^[19]。通过 PeakFit 4.0 软件解析后计算出各个二级结构的含量。

1.3.6 干制南美白对虾肌原纤维蛋白荧光吸收强度测定方法

肌原纤维蛋白的荧光吸收强度测定参考陈旭等^[19]的方法并稍作修改, 取 0.50mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液, 用荧光分光光度计测定其内源荧光性。测定条件为: 25℃ 下, 激发波长 295nm, 发射波长的扫描范围 300-400nm, 扫描速率 1000nm/min, 激发和发射狭缝宽度均为 5.0nm。空白为缓冲液。

1.3.7 干制南美白对虾肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 凝胶电泳

参考李晓等^[20]的方法并稍作修改, 将 2.00mg/mL 的肌原纤维蛋白溶液与 5× 上样缓冲液按 1:1(v/v)的比例混合, 沸水加热 5min, 制得样品。上样量为 10 μL , 初始电压为 70V, 样品进入分离胶后电压为 110V。电泳结束后剥离胶片, 考马斯亮蓝染色 30min, 温水洗脱 7h, 再用洗脱液洗脱 15min 左右至底色脱净后拍照分析。

1.3.8 干制南美白对虾甜菜碱含量测定

参考 Lengkidworraphat Phatthawin 等^[21]的方法并稍作修改, 取 1.00g 虾粉加入 10mL 蒸馏水, 匀浆 1min 后沸水浴 1h 后于 10000×g、4℃ 离心取上清液, 再用 25mL 乙醇洗涤沉淀并于 10000×g、4℃ 离心取上清液, 合并两次上清液减压旋蒸除去乙醇后定容至 100mL。配置 15g/L、pH=1.00 的饱和雷氏盐溶液, 取 1mL 样品加入 1mL 雷氏盐溶液后用乙醚洗涤结晶, 再取 2mL 丙酮溶解结晶, 最后将溶解液在分光光度计于 525nm 处测定吸光度。取 1mL 的 0.00、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50 mg/mL 甜菜碱标准溶液重复上述操作进行标准曲线绘制。空白组为蒸馏水。

1.3.9 干制南美白对虾游离氨基酸含量测定

参考 Camacho 等^[22]的方法并稍作修改,取 1.00g 虾粉加入 15mL 0.02mol/L HCl 进行均质,然后离心取上清液定容至 50mL,经 0.20 μ m 水相膜过滤后上机测定。

1.3.10 干制南美白对虾核苷酸含量测定

参考 Bai 等^[5]的方法并稍作修改,取 5.00g 虾粉加入 50mL 5%高氯酸,混合液匀浆 2min 后超声 5min,于 10000 $\times$ g、4℃离心取上清液,用 NaOH 调节 pH 为 6.50-6.80 左右,经 0.20 μ m 水相膜过滤后在液相质谱进行测定。测定条件:流动相 A 甲醇,流动相 B 为 0.05mol/L 磷酸(用 KOH 调节 pH 为 7.00),A 相:B 相=95:5,流速为 1.0mL/min, 25℃。

滋味活性值 (taste active value, TAV)为呈味物质含量值与呈味物质滋味阈值的比值。可采用味精当量(equivalent umami concentration, EUC)来评定鲜味程度^[23]。

$$EUC(g \text{ MSG}/100g)=\sum a_i b_i + 1218(\sum a_i b_i)(\sum a_j b_j)$$

式中:1218 为协同常数; a_i 为鲜味氨基酸的量(g/100g), b_i 为鲜味氨基酸相当于谷氨酸单钠的鲜味系数(Glu1.0、Asp0.077), a_j 为呈味核苷酸的量(g/100g), b_j 为呈味核苷酸相当于 IMP 的鲜味系数(AMP0.18、IMP0.10、GMP2.3)。

1.3.11 干制南美白对虾电子舌评价

参考 Xu 等^[24]的方法并进行修改,称取 10.00g 样品加入 100mL 蒸馏水均质,于 10000 $\times$ g、4℃离心后取上清液,取 65mL 左右上清液过滤后在电子舌仪器上进行测定。

1.3.12 数据分析

每组实验数据平行测定 3 次以上取平均值,实验结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 SPSS Staistics26 进行数据处理,其中单因素比较采用 one way-ANOVA 法和显著性检验方法(Duncan)多重比较,相关性分析采用皮尔逊系数双尾检验, $P<0.05$ 表示差异显著。使用 Graphpad Prism9 软件、chiplot (<https://www.chiplot.online/>)和 MetaboAnalyst(<https://www.metaboanalyst.ca/>)作图。用 SIMCA-P(14.1) 软件进行 OPLS 分析来说明滋味物质和电子舌评价结果之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 干制南美白对虾贮藏过程中的外观和色度变化

颜色是干制虾最重要的品质指标之一,图 1A 是贮藏过程中外观的变化,干制后的南美白对虾色泽鲜亮呈橘红色,随着贮藏时间的延长,虾的颜色逐渐变暗,在第 40 天时虾肉变为的深褐色,品质严重降低。图 1B 色度的变化也得到同样的结果,在贮藏过程中干制南美白对虾的亮度 L^* 、白度值 W 逐渐下降并且各组间差异性显著($P<0.05$),红度 a^* 和黄度 b^* 初期有所上升但后期变化不显著($P>0.05$),表示不同贮藏时间的虾从外观色泽上已有很大差异。生虾煮熟后由于色素蛋白的变性和红色色素的释放^[25],由青灰色变为橙红色,干制脱水后仍保持着最初明亮的橙红色,但是在贮藏过程中其颜色不断劣变,由最初的明亮的橙黄色变为褐红色。干制南美白对虾在贮藏过程中的颜色褐变可能和蛋白氧化、美拉德反应、脂质氧化有关^[10,25],其颜色变化与 Li 等^[25]在对即食虾贮藏过程中变化一致。

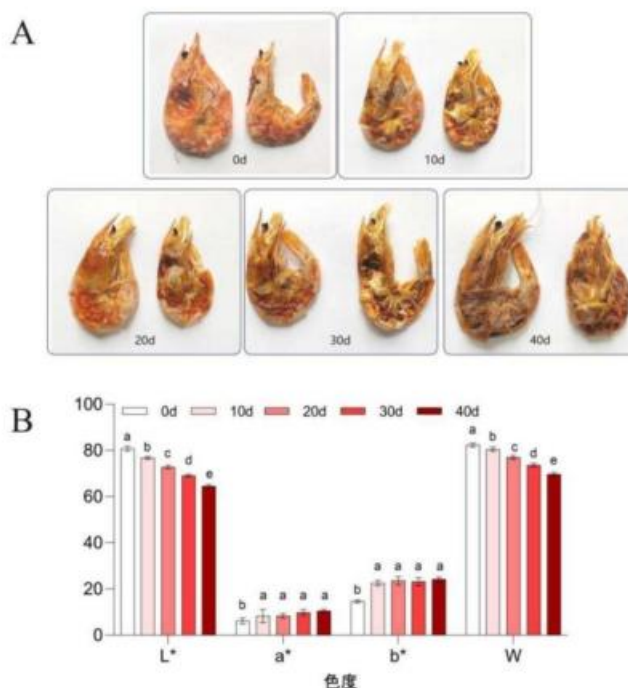


图1 干虾外观变化(A)、虾肉色度变化(B)

Fig. 1 Appearance change of dried shrimp (A)、Color change of shrimp minced meat (B)

2.2 干制南美白对虾贮藏过程中肌原纤维蛋白氧化情况

2.2.1 总巯基含量、羰基含量、疏水性的变化

蛋白氧化程度可以用总巯基含量、羰基含量、疏水性的变化来表征^[26]。总巯基含量包括了蛋白质表面和内部的活性巯基,是一种亲水基团,易被氧化为二硫键,总巯基含量越低说明蛋白质氧化程度越高^[26]。从图 2A 可以看出,在贮藏过程中干制南美白对虾肌原纤维蛋白的总巯基含量逐渐减少,这表明干制虾肉的肌原纤维蛋白暴露出来大量的巯基易于受到氧自由基的攻击,被氧化成为二硫键,引起蛋白质发生交联,总巯基含量下降^[27]。而在贮藏后期能够暴露在外的巯基含量减少,总巯基含量下降速率减慢。

蛋白质分子被氧自由基修饰后易形成羰基,羰基含量是判断蛋白质受到氧化损伤程度的重要指标,羰基含量越高说明蛋白质氧化越强烈^[26]。如图 2B 所示,在贮藏过程中虾肉肌原纤维蛋白的羰基数量不断上升,这表明贮藏时间的增加促进了虾肉中蛋白质的氧化。虾肉中羰基持续性上升可能由于蛋白质降解,原本包裹在内部的氨基酸暴露,外露的氨基酸侧链被氧化,形成了更多的羰基,进而导致羰基含量持续上升^[27]。

蛋白质的表面疏水性反映的是蛋白质分子表面的疏水性残基的相对含量,根据每微克肌原纤维蛋白结合的溴酚蓝质量表示其表面疏水性大小^[26]。由图 2C 可知,在贮藏过程中虾肉肌原纤维蛋白的表面疏水性逐渐增加。新鲜虾肉的疏水氨基酸一般是包裹于蛋白质内部,其表面疏水性较低,但随着干制以及长时间的贮藏后,蛋白质的三维结构遭到破坏,内部疏水基团外露,从而增加其表面疏水性^[28]。另外表面疏水性越高说明蛋白质变性程度越大,蛋白质正逐渐由有序变为无序状态,结构变得不稳定^[28]。温荣欣等^[29]认为疏水性氨基酸的暴露,既促进了蛋白质的降解,导致小分子肽和游离氨基酸的生成,又增加了风味载体蛋白在外露疏水区域的风味结合点位。

因此,从总巯基含量、羰基含量、疏水性的变化可以综合反映出贮藏时间的增加促进了干制南美白对虾肌原纤维蛋白的氧化反应。

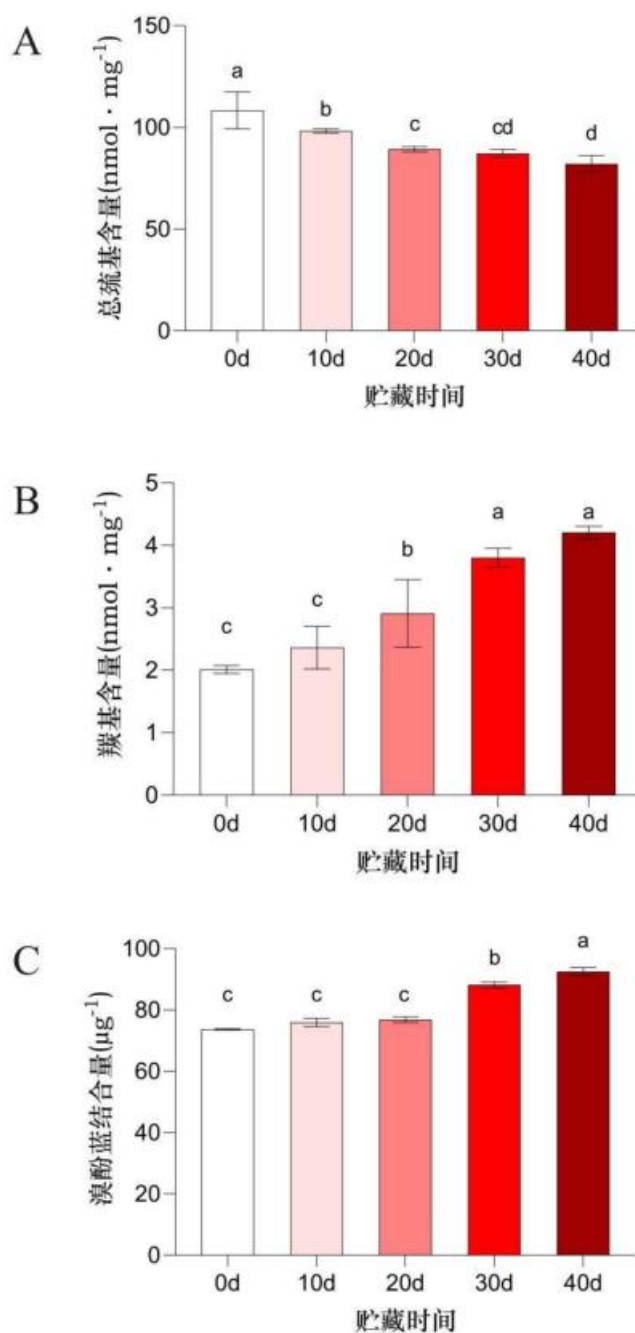


图2 总巯基含量(A)、羰基含量(B)、疏水性变化(C)

Fig. 3 Total sulfhydryl content (A), carbonylm content (B), hydrophobicity change (C)

2.2.2 荧光吸收强度变化

蛋白质中的色氨酸具有较强的内源性荧光^[30],属于疏水氨基酸,包裹于蛋白质的疏水内部,需要改变蛋白质结构、蛋白质内部疏水基团暴露后才能被氧化。当含有色氨酸残基的蛋白质暴露在亲水环境中时,荧光强度会显著降低,荧光强度的降低说明蛋白质处于部分展开或完全展开状态^[31]。因此通过测量蛋白的荧光强度变化,可以推测蛋白质三级结构变化^[30]。由图3可知,随着贮藏时间的延长,不同贮藏时间的虾肉肌原纤维蛋白波长340nm左右处荧光强度逐渐减小,说明蛋白质的三级结构发生了变化,这可能是蛋白质氧化程度增加而导致的。

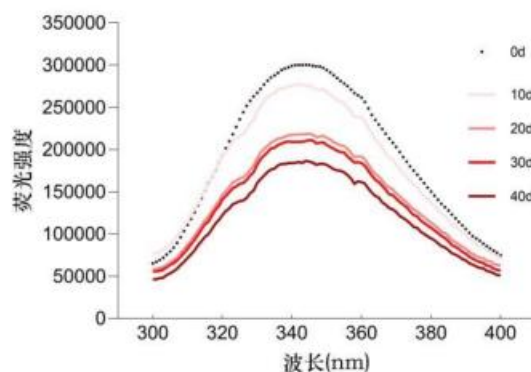


图3 肌原纤维蛋白荧光吸收强度变化

Fig. 3 Fluorescence absorption of myofibrillar protein

2.2.3 傅里叶红外图谱

图 4A 为贮藏过程中虾肉肌原纤维蛋白的傅里叶红外波谱图, 在 $1600\sim 1700\text{cm}^{-1}$ 处为蛋白质二级结构所在区域^[30] (β -折叠在 $1600\sim 1640\text{cm}^{-1}$ 、无规卷曲在 $1640\sim 1650\text{cm}^{-1}$ 、 α -螺旋在 $1650\sim 1660\text{cm}^{-1}$ 、 β -转角在 $1660\sim 1670\text{cm}^{-1}$)。将红外光谱图经 PeakFit 4.0 软件处理和积分计算后, 得到虾肉肌原纤维蛋白的不同二级结构含量如图 4B 所示。从图 4B 中可以看出, 随着贮藏时间的增加, 各组的 β -折叠也有一定程度的增加, 这可能是由于巯基氧化和二硫键的逐渐形成导致肽链折叠结构的改变^[28]; α -螺旋是一种稳定的二级结构, 其减少可能由于氧化造成氢键断裂破坏了原本的螺旋结构^[28]。 α -螺旋的减少和 β -折叠的增加, 表明了蛋白质结构正在由有序转变为无序, 与其表面疏水性增高的结果相一致。 β -转角和无规卷曲含量随着贮藏时间呈减少趋势, 也说明了蛋白质分子结构由有序向松散转化^[10]。

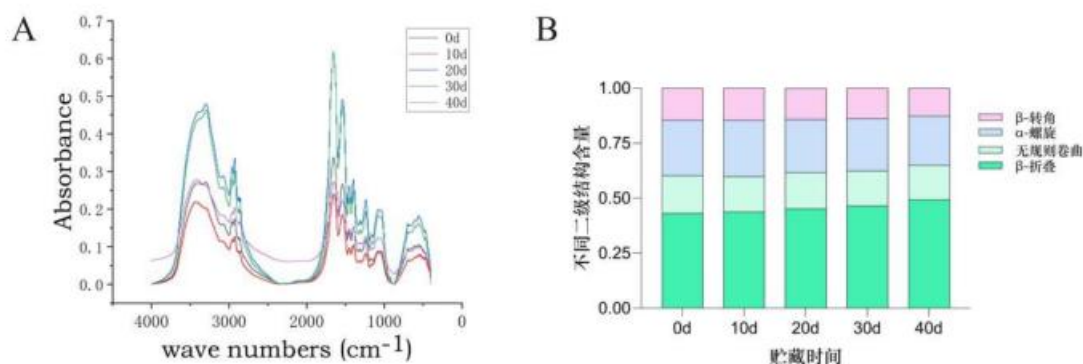


图4 肌原纤维蛋白的傅里叶红外图谱(A)、肌原纤维蛋白二级结构变化(B)

Fig. 4 Infrared spectrum (A) and secondary structure change of myofibrillar protein (B)

2.2.4 肌原纤维蛋白的 SDS-PAGE 分析

贮藏期间干制南美白对虾的肌原纤维蛋白电泳图谱如图 5 所示。其中肌球蛋白重链(MHC)的分子量约为 200KDa , 肌动蛋白约 40KDa 、原肌球蛋白约 37KDa 、肌钙蛋白 34KDa ^[32]。从图 5 中可以看出, MHC 的条带在干制第 0 天十分明显, 随着贮藏时间慢慢变浅, 在加速贮藏的第 30 天以后消失; 肌动蛋白、原肌球蛋白、肌钙蛋白 T 的条带随着贮藏时间增加而逐渐变浅。这些结果与 Fu 等^[33]的研究结果一致, 他们发现晒干南美白对虾在真空贮藏过程中 MHC 逐渐消失, 肌动蛋白和肌钙蛋白 T 都逐渐减少。本实验中的蛋白条带的降解和颜色变浅说明了蛋白质在贮藏过程中正在发生氧化, 大分子蛋白质被降解为小分子蛋白质、多肽, 甚至被分解为氨基酸^[33]。

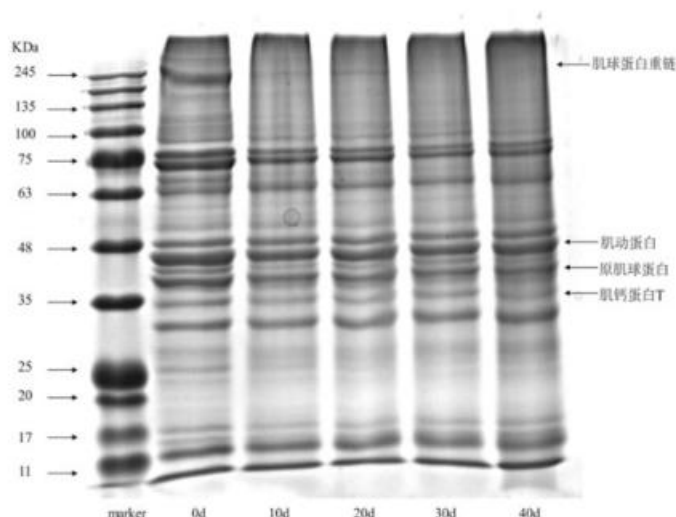


图5 肌原纤维蛋白 SDS-PAGE 凝胶电泳

Fig. 5 Myofibrillar protein SDS-PAGE gel electrophoresis

2.3 干制南美白对虾贮藏过程中滋味物质变化

2.3.1 甜菜碱含量变化

甜菜碱又称甘氨酸甜菜碱,是一种氨基酸衍生物,广泛存在动物、植物和微生物中,可保护细胞不受渗透压变化的影响^[34]。它是虾类甜味的来源之一^[34],同时能增进鲜味强度,常用在调味剂中以模仿海鲜的风味^[23]。由图6中可以看出,干制南美白对虾中的甜菜碱含量在贮藏过程中逐渐减小,后期减小速率变慢,这与Zhang等^[35]报道的双壳软体动物贮藏期间的甜菜碱变化趋势一致,其含量减少可能是在贮藏过程中逐渐被氧化。甜菜碱是一种天然营养物质,具有较高的生物活性,有研究表明它可清除氧自由基,具有抵抗炎症、预防心血管疾病等功能^[37-38]。因此,贮藏过程中甜菜碱的减少不仅降低了干制虾的甜鲜滋味,还造成了一定程度上的营养损失。

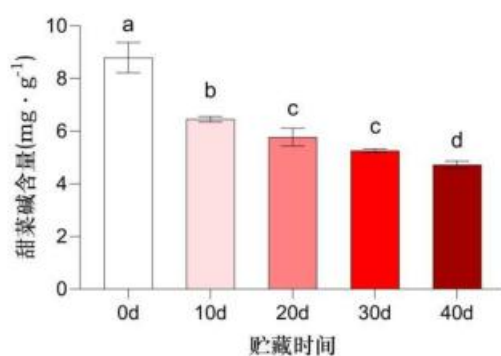


图6 干制南美白对虾甜菜碱含量

Fig. 6 Betaine content of dried *Penaeus vannamei*

2.3.2 游离氨基酸含量变化

游离氨基酸是水产品中呈味的基础物质,不同氨基酸呈现风味不尽相同,相互协同后产生具有特征性的滋味感受^[39]。由表1中可以看出,Ala、Cys、Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、Lys、His这几种氨基酸的含量均呈下降趋势,Asp、Thr、Ser、Glu、His、Arg、Pro的含量呈先上升后下降的趋势。其中Asp和Glu这两种呈鲜味的氨基酸还会与核苷酸相互作用增强干制南美白对虾的鲜味^[30]。

对不同呈味特点的游离氨基酸进行分类合计后可以看出,不同贮藏天数干制虾中三类呈味氨基酸含量均为甜味>苦味>鲜味,鲜味和苦味游离氨基酸含量先增加后减少,而甜味氨基酸的总含量呈下降

趋势。呈下降趋势的游离氨基酸含量变化可能是因为这些氨基酸不稳定,在长时间加速贮藏的条件下氧化降解了,特别是 Cys、Tyr 和 Met 对温度敏感容易氧化^[39];而含量呈先上升后下降趋势的游离氨基酸可能是因为一方面随着贮藏时间的增加蛋白质氧化分解增加了其含量,另一方面游离氨基酸会发生脱氨、脱羧等反应而转化为烃、醛、胺等,从而使其含量降低^[40]。在游离氨基酸中甜味氨基酸(Gly、Ala)的含量远高于其他氨基酸。虽然甜味氨基酸含量在不断减少,但甜味氨基酸占游离氨基酸总量 55%左右,说明游离氨基酸对于干制南美白对虾的甜味贡献较大。Arg 其含量占总游离氨基酸含量的 20%左右,是干制南美白对虾苦味的主要来源。Arg 虽然是一种苦味氨基酸,但其苦味可以被 NaCl、谷氨酸掩盖而增强甜度^[39],因此也可能对甜味有贡献。随着贮藏时间的增加,游离氨基酸总量呈下降趋势,这与 Yin^[39]等的实验结果一致。

表 1 干制南美白对虾贮藏期间游离氨基酸变化

Table 1 Changes in free amino acids during storage of dried *Penaeus vannamei*

缩写	氨基酸	0d	10d	20d	30d	40d
		含量 mg/100g	含量 mg/100g	含量 mg/100g	含量 mg/100g	含量 mg/100g
Asp	天冬酰胺	0.098±0.021 ^c	0.277±0.036 ^a	0.303±0.022 ^a	0.200±0.006 ^b	0.181±0.037 ^b
Thr	苏氨酸	2.188±0.229 ^e	2.918±0.134 ^b	3.247±0.118 ^a	2.729±0.020 ^c	2.591±0.049 ^d
Ser	丝氨酸	3.544±0.155 ^b	4.178±0.409 ^a	2.562±0.278 ^c	1.982±0.042 ^d	1.949±0.113 ^d
Glu	谷氨酸	7.508±0.230 ^d	13.294±0.401 ^a	9.496±0.145 ^b	8.986±0.181 ^c	8.940±0.534 ^c
Gly	甘氨酸	699.786±10.667 ^a	664.294±24.142 ^b	624.81±4.208 ^c	599.307±7.751 ^d	482.183±25.203 ^e
Ala	丙氨酸	360.398±23.093 ^a	342.465±17.525 ^b	294.517±2.843 ^c	285.450±6.230 ^c	213.938±14.825 ^d
Cys	半胱氨酸	0.787±0.112 ^a	0.654±0.012 ^b	0.459±0.005 ^c	0.459±0.004 ^c	0.275±0.043 ^d
Val	缬氨酸	17.128±0.337 ^a	16.815±0.656 ^a	16.989±0.395 ^a	15.749±0.921 ^b	14.644±0.297 ^c
Met	甲硫氨酸	11.900±0.353 ^a	8.488±0.323 ^b	8.081±0.217 ^c	6.755±0.399 ^d	6.212±0.103 ^e
Ile	异亮氨酸	7.620±0.144 ^a	6.778±0.274 ^b	6.689±0.180 ^b	6.075±0.335 ^c	5.676±0.105 ^d
Leu	亮氨酸	16.002±0.361 ^a	13.841±0.602 ^b	13.665±0.413 ^b	12.141±0.700 ^c	11.262±0.204 ^d
Tyr	酪氨酸	8.096±0.405 ^a	7.457±0.334 ^b	6.759±0.484 ^c	4.928±0.068 ^d	4.894±0.393 ^d
Phe	苯丙氨酸	10.531±0.109 ^a	10.367±0.532 ^a	10.253±0.222 ^a	9.363±0.471 ^b	8.823±0.303 ^c
Lys	赖氨酸	19.972±0.368 ^a	17.384±0.888 ^c	18.219±0.436 ^b	16.289±0.984 ^d	15.886±0.282 ^d
His	组氨酸	7.284±0.152 ^a	3.533±0.133 ^b	2.644±0.080 ^c	1.303±0.026 ^c	1.447±0.093 ^d
Arg	精氨酸	355.659±4.580 ^b	379.729±11.737 ^a	335.932±5.442 ^c	338.145±6.210 ^c	325.081±19.164 ^d
Pro	脯氨酸	30.602±1.957 ^a	47.501±6.919 ^b	37.138±3.006 ^c	31.761±2.809 ^b	30.327±2.135 ^d
鲜	-	7.606±0.238 ^d	13.571±0.274 ^a	9.290±0.102 ^c	9.696±0.207 ^b	9.121±0.176 ^c
甜	-	1065.916±9.600 ^a	1013.855±5.343 ^a	925.136±4.443 ^b	889.469±0.744 ^c	700.661±2.300 ^d
苦	-	722.524±7.421 ^b	762.466±2.491 ^a	668.027±9.300 ^c	681.119±1.250 ^c	638.114±1.449 ^d
无味	-	20.759±3.970 ^a	18.038±0.311 ^b	18.678±0.343 ^b	16.748±4.430 ^c	16.162±2.432 ^d
总计	-	1816.805±5.459 ^a	1807.930±30.807 ^a	1621.130±11.511 ^b	1597.030±9.607 ^c	1364.058±5.275 ^d

注^[41]: 鲜味氨基酸为 Asp、Glu; 甜味氨基酸为 Ala、Gly、Ser、Thr; 苦味氨基酸为 Arg、His、Ile、Leu、Met、Phe、Tyr、

Val、Pro; 无味氨基酸为 Cys、Lys。

2.3.3 核苷酸含量变化

除了游离氨基酸,海产品滋味的改善通常认为与核苷酸含量相关。水产品体内 ATP 在死后存在两种代谢途径,一种是 ATP-ADP-AMP-AdR-HxR-Hx,这种途径中容易积累 AMP,另一种是 ATP-ADP-AMP-IMP-HxR-Hx,这种途径中易积累 IMP^[42]。从表 2 中可以看出 IMP 的含量远高于 AMP,说明在干制南美白对虾中的 ATP 主要是以第二种途径代谢的。Xu 等人的实验结果表明小龙虾中的 IMP 远大于 AMP,与本次实验结果一致^[24]。AMP 在低浓度(小于 50~100mg/100g)时具有甜味,没有鲜味^[24]。此外 IMP 和 AMP 存在协同效应,在 IMP 存在时,AMP 会表现出鲜味,并且甜味也会增强,IMP 和

AMP 还可以与氨基酸协同作用增加干制虾鲜味^[41]。IMP 和 GMP 是可在海产、肉制品中产生强烈鲜味^[24]。在干制南美白对虾中 IMP 具有高含量并且其 TAV 值大于 1, 说明在干制南美白对虾中的主要鲜味核苷酸来源是 IMP。随着贮藏时间的增加, IMP 含量先增加并在加速贮藏第 10 天含量达到最大, 然后又逐渐减少, 说明了干制南美白对虾贮藏前期的鲜味得到了提升。Hx 是 ATP 降解的最终产物, 这类产物的大量积累会给水产品带来苦味和其他不愉快的味道^[24]。在表中核苷酸含量可知, Hx 的含量随贮藏时间延长不断增加, 这符合 ATP 的代谢规律, 也反映了贮藏时间对干制虾滋味的负面影响。通过计算贮藏南美白对虾中的味精当量 (EUC) 可知, 随着贮藏时间的延长, 其味精当量在先升高后降低, 说明贮藏期间其鲜味先是得到了提升, 但随着时间的增加又逐渐减弱, 与上述鲜味游离氨基酸变化一致。

表 2 干制南美白对虾贮藏期间核苷酸变化

Table 2 Nucleotide changes during storage of dried *Penaeus vannamei*

2.3.4 电子舌表征滋味变化

核苷酸	阈值 ^[41]	0d		10d		20d		30d		40d	
		含量 mg/100g	TAV	含量 mg/100g	TAV	含量 mg/100g	TAV	含量 mg/100g	TAV	含量 mg/100g	TAV
IMP	25	224.753±2.969 ^b	8.990	238.819±4.113 ^a	9.553	228.991±17.348 ^b	9.160	208.021±12.929 ^c	8.321	207.622±1.248 ^c	8.305
AMP	50	6.840±0.179 ^c	0.137	7.448±0.182 ^d	0.149	9.773±0.225 ^a	0.195	9.494±0.197 ^b	0.190	8.392±0.044 ^c	0.168
GMP	12.5	1.583±0.190 ^a	0.127	1.382±0.124 ^b	0.111	0.376±0.050 ^c	0.030	0.372±0.013 ^c	0.030	0.322±0.036 ^c	0.026
Hx	-	77.775±0.922 ^b	-	81.768±1.270 ^a	-	81.138±5.732 ^a	-	82.190±3.990 ^a	-	82.067±0.385 ^a	-
EUC	-	2.117±0.075 ^d	-	3.978±0.099 ^a	-	2.556±0.183 ^a	-	2.450±0.183 ^b	-	2.297±0.142 ^c	-

电子舌传感器系统由甜味 (GL1)、苦味 (C00)、咸味 (CT0)、鲜味 (AAE)、酸味传感器 (CA0) 5 个传感器组成^[43]。其中甜味、苦味、咸味、鲜味为综合味觉特定, 而丰富度 (即鲜味回味) 为持续性味觉特点^[43]。电子舌的实验结果以味觉活度值表示, KCl 和酒石酸组成的对照溶液的味觉活度值为无味点, 咸味的无味点为-6, 其他风味的无味点为 0^[43]。样品测定后通过计算各个传感器的味觉活度值, 建立不同贮藏时间干制南美白对虾的滋味雷达图 (样品的酸味味觉活度值均低于无味点, 即没有酸味), 结果如图 7 所示。从图 4 中可以看出, 干制南美白对虾的鲜味和丰富度最为突出, 说明其具有强烈而持续的鲜味口感。随着贮藏时间的增加, 鲜味和甜味降低, 苦味逐渐升高, 咸味无明显变化, 这可能是游离氨基酸、核苷酸以及甜菜碱综合作用的结果, 甜味的下降与甜菜碱的含量变化相同。丰富度随贮藏时间呈先增加后减少的趋势, 与鲜味氨基酸和 IMP 含量变化趋势一致, 表明在贮藏前期干制南美白对虾的滋味差别不大, 长时间贮藏则会使滋味劣变。

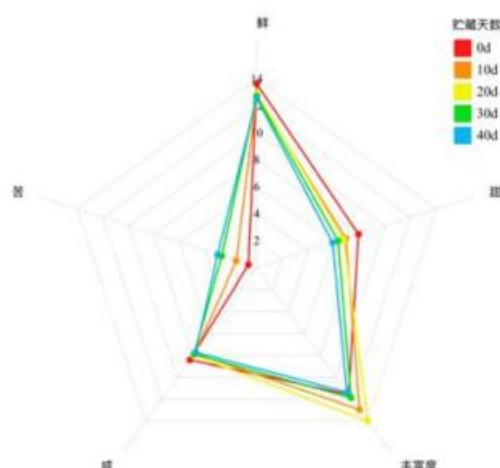


图 7 不同贮藏时间干制南美白对虾的电子舌分析雷达图

Fig. 7 Electronic tongue taste radar image of dried *Penaeus vannamei* at different storage time

2.4 相关性分析

2.4.1 肌原纤维蛋白氧化与呈味物质相关性分析

总巯基含量越低、羰基含量和疏水性越高表示蛋白氧化程度越高。从图 8A 中可以看出,总巯基含量与贮藏天数呈负相关,羰基含量和疏水性与贮藏天数呈正相关,说明随着贮藏时间的增加,蛋白氧化加深。仅 AMP 和 Hx 含量与贮藏天数呈正相关,鲜味氨基酸与贮藏天数无明显差异,其他滋味物质含量则与贮藏天数呈负相关,说明随着贮藏时间的增加,滋味物质含量在减少。而羰基含量和疏水性与 AMP 和 Hx 含量呈正相关、与其他滋味物质含量呈负相关,说明随着蛋白氧化的加深,滋味物质含量减少。

2.4.2 呈味物质与电子舌分析结果相关性分析

从图 8B 中可以看出,贮藏时间和鲜味、甜味、咸味呈负相关,和苦味呈正相关。甜菜碱与鲜味、甜味和咸味呈正相关,与苦味呈负相关,表明甜菜碱含量对干制南美白对虾的滋味影响是积极的。IMP、GMP、甜味氨基酸和苦味氨基酸含量对于鲜味、甜味和咸味呈正相关,对于干制南美白对虾的滋味影响是正向的。而 AMP 与 Hx 与苦味氨基酸呈正相关,与鲜味、甜味和咸味呈负相关,其对于样品滋味会产生负面影响。鲜味氨基酸含量仅与丰富度呈相关,这可能是由于干制虾的滋味体系是众多不同滋味物质的作用结果。

采用 OPLS 分析研究了滋味物质与电子舌呈味结果的相关性。将滋味物质含量和电子舌不同滋味呈味强度分别设为 X 和 Y 变量,处于同一象限表示其具有正相关性。如图 8C 所示,甜菜碱与鲜味、甜味和咸味具有正相关性,苦味和 AMP、Hx 含量呈正相关,而丰富度与甜味氨基酸、苦味氨基酸、IMP、GMP 具有正相关关系。

2.4.3 肌原纤维蛋白氧化与电子舌结果相关性分析

总巯基含量越低、羰基含量和疏水性越高说明蛋白质氧化程度越强。从图 8D 中可知,羰基含量和疏水性与鲜味、甜味、鲜味和丰富度呈负相关,与苦味呈正相关,表明肌原纤维蛋白氧化程度与干制南美白对虾的鲜味、甜味、鲜味和丰富度呈负相关,与苦味呈正相关。说明在干制南美白对虾中,肌原纤维蛋白氧化对滋味产生负面影响,在加速贮藏过程中,随着蛋白的不断氧化,干制南美白对虾的滋味逐渐劣变。

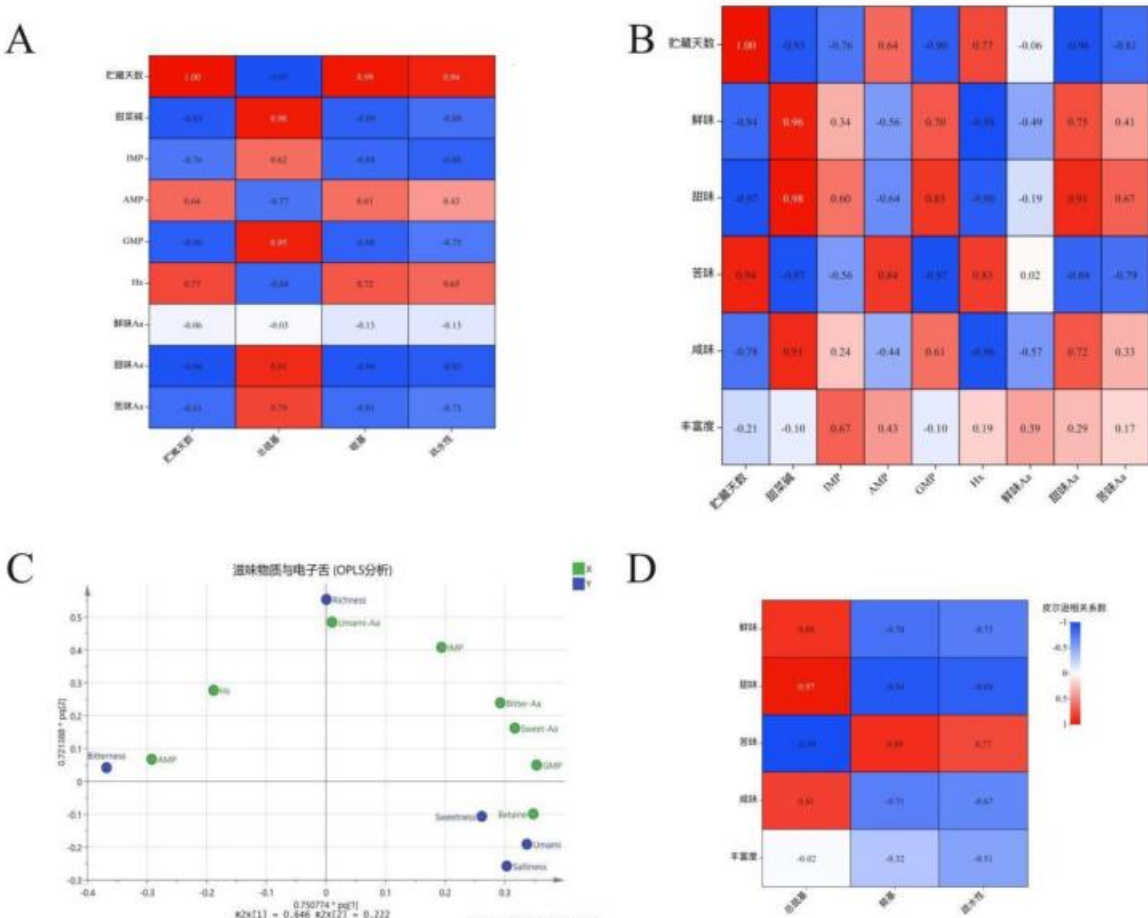


图 8 肌原纤维蛋白氧化与滋味物质含量变化的相关性热图(A)、滋味物质含量变化与电子舌分析结果的相关性热图(B)、滋味物质与电子舌结果的 OPLS 分析(C)、肌原纤维蛋白氧化与电子舌分析结果的相关性热图(D)

Fig. 8 Heat map of correlation between myofibrillar protein oxidation and change of taste substance content (A), heat map of correlation between the change of taste substance content and the result of electronic tongue analysis (B), OPLS analysis of taste substance and electronic tongue results(C) and heat map of correlation between myofibrillar protein oxidation and results of electronic tongue analysis(D)

注: Betaine 甜菜碱, Umami-Aa 鲜味氨基酸, Sweet-Aa 甜味氨基酸, Bitter-Aa 苦味氨基酸, Umami 鲜味, Sweetness 甜味, Bitterness 苦味, Saltiness 咸味, Richness 丰富度。

3 结论

本研究测定了干制南美白对虾贮藏过程中的色泽变化、肌原纤维蛋白氧化程度、滋味物质含量和电子舌呈味情况,并对其进行相关性分析。研究表明,干制虾在贮藏期间颜色变黑变暗,肌原纤维蛋白氧化程度不断加深,滋味物质含量变化显著,电子舌表征滋味鲜美度不断下降。随着肌原纤维蛋白的氧化,滋味物质含量下降,鲜味、甜味、咸味和丰富度减弱、苦味增强。干制南美白对虾中肌原纤维蛋白的氧化与滋味鲜美度呈负相关,说明了在贮藏过程中蛋白氧化会使干制虾的滋味劣变。对于提升干制南美白对虾的贮藏品质的调控方法还有待于进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 郑婉秋, 车斌, 孙琛. 广东湛江南美白对虾价值链实证研究[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(7):25-31. DOI: 10.20016/j.cnki.hykyfjgl.2021.07.004
- [2] 员冬玲, 王寿权, 耿文广, 等. 热预处理对南美白对虾干燥过程和产品品质的影响[J]. 山东科学, 2019, 32(4):121-126. DOI: 10.3976/j.issn.1002-4026.2019.04.017
- [3] HAN Xinyuan, FAN Zhenyu, CONG Jiaojiao, et al. Changes of taste substances in frozen tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during freeze-thaw cycles[J]. Food Science, 2022, 43(2): 269-275. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20201203-048.
- [4] CHEN de wei, ZHANG min. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Chemistry, 2007, 104(3). DOI: 10.1016/j.foodchem.2007.01.042
- [5] BAI jing, FAN yan, ZHU lulu, et al. Characteristic flavor of Antarctic krill (*Euphausia superba*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) induced by thermal treatment.[J]. Food chemistry, 2022, 378. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.132074
- [6] LIANG rui, LIN songyi, CHEN dong, et al. Differentiation of *Penaeus vannamei* from different thermal processing methods in physico-chemical, flavor and sensory characteristics.[J]. Food chemistry, 2022, 378. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.132092
- [7] 沈思远, 施文正, 曲映红, 等. 热风微波联合干燥过程中南美白对虾滋味物质变化研究[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(03):52-61. DOI: 10.12301/j.issn.2095-6002.2021.03.006
- [8] HELLWIG Michael. The Chemistry of Protein Oxidation in Food.[J]. Angewandte Chemie (International ed. in English), 2019, 58(47). DOI: 10.1002/anie.201814144
- [9] LI de yang, LIU zi qiang, LIU bing, et al. Effect of protein oxidation and degradation on texture deterioration of ready-to-eat shrimps during storage.[J]. Journal of food science, 2020, 85(9). DOI: 10.1111/1750-3841.15370
- [10] 徐文雅, 马倩云, 王佳荣, 孙剑锋, 汤铁伟, 王颀, 王文秀. 南美白对虾热风干制过程蛋白质与品质变化关系分析[J/OL]. 食品科学: 1-14 [2022-12-05]. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20220715-173
- [11] XIAO naiyong, XU huiya, GUO quanyou, et al. Effects of flavourzyme addition on protein degradation and flavor formation in grass carp during fermentation.[J]. Journal of food biochemistry, 2022. DOI: 10.1111/JFBC.14405
- [12] ELLIOT mubango, CHEN jing, CHEN dongzhi, et al. Effects of a cold plasma-assisted shrimp processing chain on biochemical and sensory quality alterations in Pacific white shrimps (*Penaeus vannamei*). [J]. Food science and technology international = Ciencia y tecnologia de los alimentos internacional, 2021. DOI: 10.1177/10820132211050847
- [13] OLADIPUPO odunayo olatunde, STEFFI louisella tan, KHURSHEED ahmad shiekh, et al. Ethanolic guava leaf extracts with different chlorophyll removal processes: Anti-melanosis, antibacterial properties and the impact on qualities of Pacific white shrimp during refrigerated storage[J]. Food Chemistry, 2021, 341(Pt 2). DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128251
- [14] LI de yang, XIE hong kai, LIU zhong yuan, et al. Shelf life prediction and changes in lipid profiles of dried shrimp (*Penaeus vannamei*) during accelerated storage[J]. Food Chemistry, 2019, 297. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.124951
- [15] 常莉莉, 王瑗琳, 刘祉好, 等. 不同水分含量对自热后烤制带鱼品质影响的比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(03):143-151+327. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0598.
- [16] 胡熠, 张进杰, 唐艳, 等. 没食子酸对海鳗肌原纤维蛋白氧化及凝胶特性的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(11):2203-2210. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.11.2203
- [17] 赵冰, 李素, 张顺亮, 等. 蛋白氧化对肌原纤维蛋白凝胶构效关系的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(03):55-

61. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201803009.
- [18] 贾娜, 金伯阳, 刘丹, 等. 儿茶素对肌原纤维蛋白氧化、结构及凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(04): 13-19. DOI: 10.7506/rlyj1001-8123-20200220-043
- [19] 陈旭, 余璐涵, 蔡茜茜, 等. 低温冷链贮藏对鱼糜凝胶化学作用力和肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J/OL]. 食品科学: 1-13[2022-12-04]. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20220512-156
- [20] 李晓, 王颖, 刘洪军, 等. 0℃贮藏下南美白对虾品质变化研究[J]. 核农学报, 2020, 34(12): 2734-2741. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2020.12.2734
- [21] LENGKIDWORRAPHIPHAT phatthawin, WONGPOOMCHAI rawiwan, BUNMEE thanaporn, et al. Taste-Active and Nutritional Components of Thai Native Chicken Meat: A Perspective of Consumer Satisfaction[J]. Food science of animal resources, 2021, 41(2). DOI: 10.5851/KOSFA.2020.E94
- [22] CAMACHO carolina, CORREIA tatiana, TEIXEIRA bórbara. Nucleotides and free amino acids in sea urchin *Paracentrotus lividus* gonads: Contributions for freshness and overall taste[J]. Food Chemistry, 2023, 404(PA). DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.134505
- [23] 李婉君. 南极磷虾与南美白对虾营养与滋味成分比较[D]. 上海海洋大学, 2015.
- [24] XU xiaodi, SUN cunxin, LIU bo, et al. Flesh flavor of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii* Girard, 1852) processing by GS-IMS and electronic tongue is changed by dietary animal and plant protein[J]. Food Chemistry, 2022, 373(PB). DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2021.131453
- [25] LI de yang, ZHEN yuan, LIU zi qiang, et al. Effect of oxidation and maillard reaction on color deterioration of ready-to-eat shrimps during storage[J]. LWT, 2020, 131. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109696
- [26] LI yin , LI xia, WANG jin zhi, et al. Effects of Oxidation on Water Distribution and Physicochemical Properties of Porcine Myofibrillar Protein Gel[J]. Food biophysics, 2014, 9(2). DOI: 10.1007/s11483-013-9329-9
- [27] QIU shuang, CUI fangchao, WANG jinxiang, et al. Effects of ultrasound-assisted immersion freezing on the muscle quality and myofibrillar protein oxidation and denaturation in *Sciaenops ocellatus*. [J]. Food chemistry, 2021, 377. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2021.131949
- [28] MI jie, NI wei, HUANG ping, et al. Effect of acetylated distarch adipate on the physicochemical characteristics and structure of shrimp (*Penaeus vannamei*) myofibrillar protein. [J]. Food chemistry, 2021, 373(PB). DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2021.131530
- [29] 温荣欣, 扈莹莹, 殷小钰, 等. 食盐添加量对哈尔滨风干肠脂质和蛋白氧化及挥发性化合物形成的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(02): 29-36. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20190203-020.
- [30] CHIZA OBA EKEZIE flora glad, CHENG jun hu, SUN da wen . Effects of Atmospheric Pressure Plasma Jet on the Conformation and Physicochemical Properties of Myofibrillar Proteins from King Prawn (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food Chemistry, 2018, 276. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.113
- [31] SHEN shike, BU qianyun, YU wentao, et al. Interaction and binding mechanism of lipid oxidation products to sturgeon myofibrillar protein in low temperature vacuum heating conditions: Multispectroscopic and molecular docking approaches[J]. Food Chemistry: X, 2022, 15. DOI: 10.1016/J.FOCHX.2022.100389
- [32] DENG shanggui, PHARES choto lutema, BLESSING gwekwe, et al. Bitter peptides increase engulf of phagocytes in vitro and inhibit oxidation of myofibrillar protein in peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during chilled storage[J]. Aquaculture Reports, 2019, 15(C). DOI: 10.1016/j.aqrep.2019.100234
- [33] FU yuye, LIU yaqiong, WANG wenxiu, et al. Models for Predicting Quality of Solar-Dried Shrimp (*Penaeus vannamei*) during Storage Based on Protein Oxidation[J]. Hindawi, 2021. DOI: 10.1155/2021/1493927
- [34] MARIA F. delgado gaytán, SILVIA gómez Jiménez, LUIS A. gómez alejo, et al. Effect of salinity on the synthesis and concentration of glycine betaine in osmoregulatory tissues from juvenile shrimps *Litopenaeus vannamei* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, 2020, 240(C). DOI:

10.1016/j.cbpa.2019.110628

- [35] ZHANG rong, WEI jia, LIN shi. A Comprehensive Review on the Development of Foodomics-Based Approaches to Evaluate the Quality Degradation of Different Food Products[J]. Food Reviews International, 2022. DOI: 10.1080/87559129.2022.2077362
- [36] ARUMUGAM madan kumar, PAAL matthew c, DONOHUE terrence m, et al. Beneficial Effects of Betaine: A Comprehensive Review.[J]. Biology,2021,10(6). DOI: 10.3390/BIOLOGY10060456
- [37] UELAND per magne. Choline and betaine in health and disease.[J]. Journal of inherited metabolic disease,2011,34(1). DOI: 10.1007/s10545-010-9088-4
- [38] 李顺泽, 伍振煌, 王俊龙. 甜菜碱的生物功能、药理活性及其在动物生产中的应用研究进展[J/OL]. 饲料研究,2022(21):150-155[2022-12-12]. DOI:10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2022.21.031.
- [39] YIN mingyu, MATSUOKA ryosuke, YANAGISAWA takuya, et al. Effect of different drying methods on free amino acid and flavor nucleotides of scallop (*patinopecten yessoensis*) adductor muscle[J]. Food Chemistry,2022,396. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2022.133620
- [40] 徐姝, 刘冬梅, 王勇, 等. 蒸烤模式对南美白对虾食用品质的影响[J]. 食品科学,2021,42(03):136-142. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20191218-201.
- [41] 李双琦, 崔震昆. 热处理方式对鲈鱼游离氨基酸及品质影响[J]. 中国调味品,2022,47(01):32-35+45. DOI: 10.3969/J.ISSN.1000-9973.2022.01.006.
- [42] XU yanshun, CHEN yanping, CAO yaqun, et al. Effect of Steam Cooking on Textural Properties and Taste Compounds of Shrimp (*Metapenaeus ensis*)[J]. Food Science and Technology Research,2016,22(1). DOI: 10.3136/fstr.22.75
- [43] SURANYI József, ZÁUKU Johnlewis zinia, FRIEDRICH lászló, et al. Electronic Tongue as a Correlative Technique for Modeling Cattle Meat Quality and Classification of Breeds[J]. Foods,2021,10(10). DOI: 10.3390/FOODS10102283