

不同灭菌方式即食海参室温贮藏稳定性的比较

于笛^{1,2}, 刘煜珺¹, 李龙¹, 傅志宇^{1,2}, 杨芯蕊³, 郑杰^{1,2*}

(1. 辽宁省海洋水产科学研究院, 辽宁大连 116023) (2. 农业农村部水产种质资源保护与发掘利用重点实验室, 辽宁大连 116023) (3. 大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁大连 116023)

摘要: 研究了4种灭菌方式对即食海参室温贮藏稳定性的影响。结果表明: 110 ℃ 10 min 和 121 ℃ 5 min 灭菌后体壁持水性更好, 硬度分别为 522.78 g 和 470.22 g, 贮藏 15 d 质量损失率分别为 7.64% 和 12.26%, 水分含量在 82.98%~86.63% 之间, pH 值相对稳定, 菌落总数分别为 505 CFU/g 和 0 CFU/g, 贮藏过程中挥发性气味变化不大且主要以海参特征挥发性物质甲基类化合物为主, 微观结构变化不大。90 ℃ 30 min 灭菌后, 硬度、咀嚼性和弹性分别为 685.90 g、616.30 g 和 0.93, 菌落总数在贮藏 9 d 时超标, 贮藏 15 d 质量损失率为 17.20%, 体壁胶原纤维结构变得松散, pH 值下降了 3.62%。80 ℃ 和 90 ℃ 加水 30 min 灭菌后, 挥发性气味变淡, 贮藏 3 d 时体壁开始变软, 检测到粘性, 6 d 开始腐烂变质, 贮藏后期硫化物增加, 纤维结构呈片状和明胶状, 15 d 时硬度分别下降了 81.57% 和 87.96%, 粘性增加到 -40 g·s 左右。综上, 90 ℃, 30 min、110 ℃, 10 min 和 121 ℃, 5 min 灭菌可分别延长即食海参室温贮藏时间至 6 d、12 d 和 15 d。该研究可为即食海参室温贮藏保鲜技术提供一定理论依据。

关键词: 即食海参; 灭菌; 室温; 贮藏; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2025)07-178-188

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0630

Comparison of Room-temperature Storage Stability of Instant Sea Cucumbers Sterilized Using Different Methods

YU Di^{1,2}, LIU Yujun¹, LI Long¹, FU Zhiyu^{1,2}, YANG Xinrui³, ZHENG Jie^{1,2*}

(1. Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China) (2. Key Laboratory of Protection and Utilization of Aquatic Germplasm Resource, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dalian 116023, China) (3. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: The effects of four sterilization methods on the storage stability of instant sea cucumbers at room temperature were studied. The results show that, after sterilization at 110 ℃ for 10 min and 121 ℃ for 5 min, the body wall tissues of instant sea cucumbers exhibit better water-holding capacities, and the corresponding hardness values are 522.78 g and 470.22 g, respectively. After 15 days of storage, the mass-loss rates were 7.64% and 12.26%, respectively, while the moisture content was between 82.98% and 86.63%. Meanwhile, the pH is relatively stable, and the total viable counts were 505 CFU/g and 0 CFU/g, respectively. The volatile odor changed significantly during storage, and the characteristic volatile substances of

引文格式:

于笛,刘煜珺,李龙,等.不同灭菌方式即食海参室温贮藏稳定性的比较[J].现代食品科技,2025,41(7):178-188.

YU Di, LIU Yujun, LI Long, et al. Comparison of room-temperature storage stability of instant sea cucumbers sterilized using different methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 178-188.

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 辽宁省农科院农业绿色高质量发展专项 (2021HQ1917); 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300287); 辽宁省农科院院长基金项目 (2022QN2322); 大连市揭榜挂帅技术攻关项目 (2023JB11SN007)

作者简介: 于笛 (1986-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 水产品精深加工和综合利用, E-mail: yudi1986@126.com

通讯作者: 郑杰 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 水产品精深加工和综合利用, E-mail: zhengjiessd@163.com

instant sea cucumbers mainly consist of methyl compounds. In addition, no notable changes in microstructure were observed. After sterilization at 90 °C for 30 min, the hardness, chewiness, and elasticity of instant sea cucumbers were 685.90 g, 616.30 g and 0.93, respectively. The total viable count exceeded the acceptable limit on the 9th day of storage. After 15 days of storage, the mass-loss rate was 17.20%, while the collagen fiber structure of the body wall loosened. In addition, the pH decreases by 3.62%. After sterilization with water at 80 °C and 90 °C for 30 min, the volatile odor faded. On the 3rd day of storage, the body wall began to soften, and adhesiveness was detected. The instant sea cucumbers began to rot on the 6th day of storage. In the late stage of storage, the sulfide content increased, while the fiber structure was flakey and gelatin-like. After 15 days of storage, the hardness of the instant sea cucumbers sterilized with water at 80 °C and 90 °C decreased by 81.57% and 87.96%, respectively. At the same time, the adhesiveness increased to about -40 g.s. In conclusion, sterilization at 90 °C for 30 min, 110 °C for 10 min, and 121 °C for 5 min prolonged the room-temperature storage time of instant sea cucumbers to 6, 12, and 15 days, respectively. This study provides a theoretical basis for the storage and preservation technology of instant sea cucumbers at room temperature.

Key words: instant sea cucumbers; sterilization; room temperature; storage; stability

刺参 (*Apostichopus japonicus*) 是一种底栖棘皮类动物, 是我国重要的海水养殖品种, 同时也是我国乃至东南亚地区目前市场最畅销、价格最高的海参品种^[1]。海参体壁富含皂苷、酸性粘多糖等许多具有抗菌、抗癌、抗血栓、延缓机体衰老和提高机体免疫力等功效的生物活性物质^[2,3]。即食海参属于开袋即食的一种海参产品, 与干海参相比, 它可以保留海参原有的外观和风味, 而营养成分和生物活性物质的损失基本可以忽略不计^[4]。对于消费者来说即食海参的食用方法也更加省时和便捷, 省去了处理干海参要进行的泡发、炖煮等复杂操作。研究发现, 即食海参产品在 4 °C 贮藏 1 周左右品质明显下降, 主要原因是微生物的作用和水分的损失^[5]。目前, 几乎所有市售的即食海参产品都标明需冷冻保存, 解冻后方可食用, 不能做到冷藏保存甚至常温保存, 也不能做到真正的开袋即食。若在冷藏或室温条件下, 微生物在适宜条件下会迅速增长导致产品极易发生变质。多数即食海参生产企业在海参泡发结束后要马上进行“定形”, 即速冻, 而后进行包装入库从而确保产品的外形包装美观, 但存在一定的安全隐患。因此, 关于提高即食海参在冷藏甚至室温条件下贮藏稳定性的相关研究具有一定的必要性。目前, 对于新鲜海参体壁贮藏稳定性的研究较多^[6,7], 也有关于即食海参灭菌的相关研究, 如赵园园等^[8]考察了不同高压灭菌后的即食海参贮藏期间品质变化, 袁文鹏等^[9]比较了多段高压杀菌方式对海参品质的影响。本研究综合了目前市售的几种即食海参产品种类, 分别采用低温、亚高温和高温对即食海参进行灭菌处理, 分析不同灭菌方式对

即食海参 25 °C 贮藏过程中稳定性的影响, 以期即为即食海参及其相关制品的品质改善和提升提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

新鲜海参, 购于大连市鑫玉龙海洋生物种业科技股份有限公司。2.5% (ϕ) 戊二醛、 NaH_2PO_4 、 Na_2HPO_4 、无水乙醇、 NaCl 等试剂均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

HB43-S 型卤素快速水分测定仪、FE20K 型酸度仪、ME204 型分析天平, 瑞士 METTLER TOLEDO 公司; DZD-500/S 型单室真空包装机, 江苏腾通包装机械有限公司; LG-1.0 型真空冷冻干燥机, 沈阳航天新阳速冻设备制造有限公司; HH-6 型数显恒温水浴锅, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; TA.XT Plus 型物性测试仪, 英国 Stable Micro System 公司; PEN3 型电子鼻, 德国 Airsense 公司; SX700 型高压蒸汽灭菌器, 日本 Tomy 公司; SW-CJ-2FD 型超净工作台, 苏州安泰空气技术有限公司; IN612C 型恒温培养箱, 日本 YAMATO 公司; SU810 型扫描电子显微镜, 日本 HITACHI 公司。

1.3 方法

1.3.1 原料的处理

新鲜海参加冰运送至实验室后立即进行解剖, 沸水煮 30 min 后捞出并沥干水分, 冷却至室温后摆

盘速冻,装袋密封置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存。取432只海参,解冻后加入纯净水在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下泡发72 h,每24 h换1次水。泡发结束后清洗并沥干水分,装袋后真空包装,根据不同灭菌条件分为以下6组,每组72只:

对照组(C):速冻后真空包装;低温灭菌组(S1):真空包装后, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌30 min;亚高温灭菌组(S2):真空包装后, $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌10 min;高温灭菌组(S3):真空包装后, $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌5 min;80 $^{\circ}\text{C}$ 加水灭菌组(S4):加入10 mL纯净水并真空包装后 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌30 min;90 $^{\circ}\text{C}$ 加水灭菌组(S5):加入10 mL纯净水并真空包装后 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灭菌30 min。

1.3.2 样品的贮藏

将不同条件下灭菌处理的海参在室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下贮藏15 d,每3 d取一次样,每组72只,每次取12只进行测定,拍照记录海参形态。

1.3.3 菌落总数的测定

采用GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》^[10]中的方法进行测定。称取25 g样品置于225 mL无菌生理盐水并进行10倍递增梯度稀释,选择2~3个适宜稀释度,吸取1 mL样品匀液加入平板并倒入15~20 mL冷却至 $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的平板计数琼脂培养基,混合均匀,待凝固后将平板倒置于培养箱中,在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下培养72 h后进行计数,每个稀释度做2个平皿。

1.3.4 质量损失率的计算

将样品除去包装袋后放入培养皿中,分别称量样品的总质量、体壁质量和液体质量,按照下面公式计算质量损失率:

$$M = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

M ——质量损失率, %;

m_1 ——液体质量, g;

m ——样品总质量, g。

1.3.5 水分含量的测定

采用快速水分测定仪测定水分含量。称取一定量样品,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行测定,每组3个平行。

1.3.6 pH值的测定

按照GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品pH值的测定》^[11]中的方法进行测定。称取一定量切碎样品,加入新煮沸且冷却至室温的去离子水并定容至100 mL后,静置30 min,6 000 r/min条件下离心10 min,测定上清液pH值,每组3个平行。

1.3.7 质构的测定

在海参背部居中位置取 $1.5 \times 1.5\text{ cm}$ 的体壁,剪掉体表疣足,采用P/0.5探头进行测定,测前、测中、测后速度均为 0.5 mm/s ,形变量50%,感应力 5 g ^[12]。

1.3.8 挥发性物质的测定

称取3.0 g剪碎的样品放于顶空瓶内,置于 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴中孵育30 min后上机检测。进样调零时间10 s、准备时间5 s、采集时间120 s、进样量300 mL/min,清洗时间200 s,每组3个平行^[13]。

1.3.9 微观结构的观察

取海参背部中心区域约 $1 \times 1 \times 3\text{ mm}$ 样品,加入2.5% (φ) 戊二醛固定12 h以上,用0.1 mol/L磷酸缓冲液漂洗并用乙醇溶液进行梯度脱水($\varphi=30\%$ 、50%、70%、80%、100%),二氧化碳临界点干燥并用离子喷金镀膜后,进行扫描电子显微镜观察^[14]。

1.4 数据处理

采用SPSS 22.0进行数据处理,显著性分析采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 则认为差异显著,采用Origin 2021和Graphpad Prism 9.5.1作图。

2 结果与讨论

2.1 形态的变化

不同方式灭菌后即食海参 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏过程中的外观形态变化如图1和图2所示。灭菌处理后(0 d),C组海参疣足挺拔饱满,有少量液体析出,S1、S2和S3组几乎没有液体析出,且随着灭菌温度的升高,海参体积明显变小。加水灭菌后的海参,析出的液体颜色较深。C组和S4、S5组海参体壁呈现深棕色,S1、S2和S3组随着灭菌温度的升高体壁颜色逐渐加深,且高压灭菌后的样品,由于胶原蛋白的分解形成部分明胶凝固后,表面呈现出具有光泽的胶质感^[15,16]。

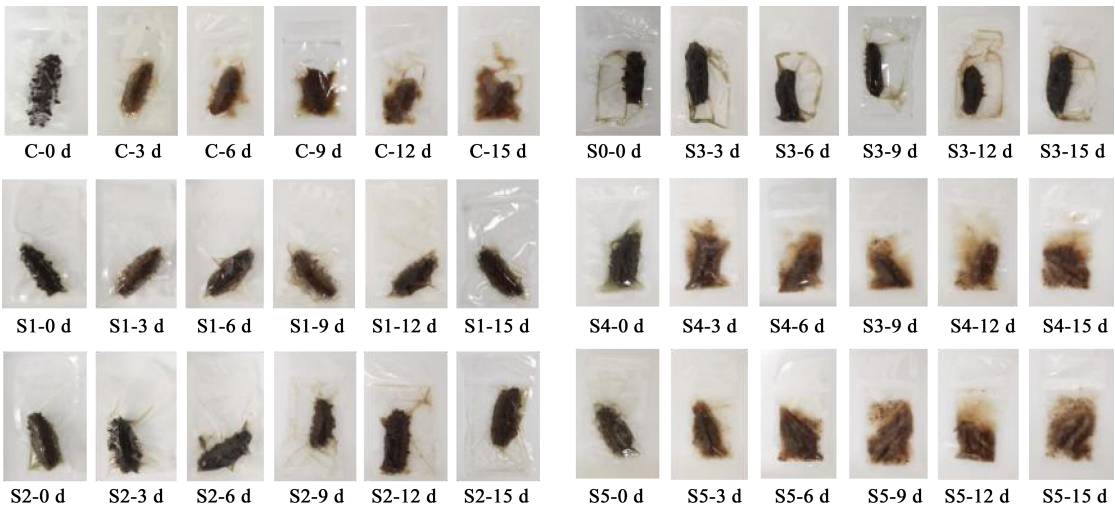


图 1 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中形态的变化 (含包装)

Fig.1 Morphological changes of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods (Packaged)



图 2 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中形态的变化 (去包装)

Fig.2 Morphological changes of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods (Unpackaged)

25℃贮藏过程中, C组3d时体壁变软, 颜色变浅, 部分疣足开始分解变短, 液体析出增多, 内筋出现断裂。随着贮藏时间的延长, 体壁由外向内逐渐腐烂变得粘软, 腐败气味逐渐增强, 15d时基本失去原有形态, 严重影响其感官品质。S1组贮藏过程中, 除液体析出有缓慢增加的现象外, 外观整体变化不大。S2和S3组贮藏期内未观察到明显变化。S4和S5组均在贮藏3d时体壁开始变软, 6d开始腐烂变质, 出现明显腐败气味, 且随着腐败程度的加剧, 析出液体颜色逐渐变深且越来越粘稠。高含水量会使即食海参在贮藏过程中发生品质劣变, 导致货架期变短^[17]。目前市场上存在加水灭菌销售的即食海参产品, 但在本实验中, 同样条件下, 加水后灭菌并不能改善灭菌效率反而会加速腐败, 这可能是加水使水分含量增加同时总体积变大灭菌不充分导致的。

2.2 质量及质量损失率的变化

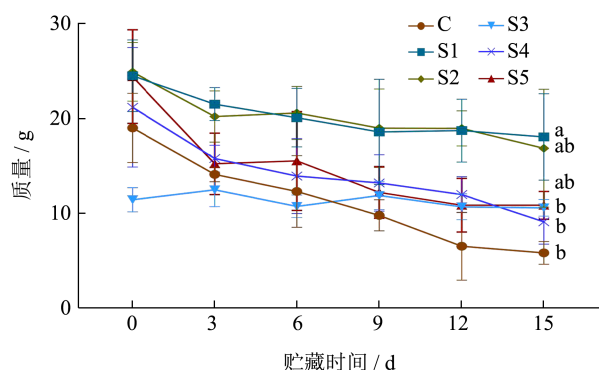


图3 不同方式灭菌即食海参25℃贮藏过程中质量的变化
Fig.3 Mass changes of instant sea cucumbers during storage at 25℃ by different sterilization methods (n=3)

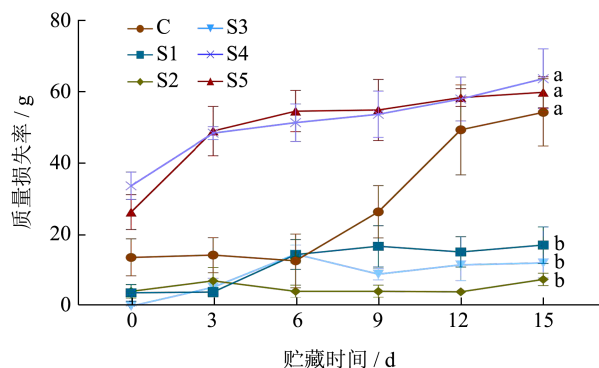


图4 不同方式灭菌即食海参25℃贮藏过程中质量损失率的变化
Fig.4 Mass loss rate changes of instant sea cucumbers during storage at 25℃ by different sterilization methods (n=3)

水分流失会改变海参的质地和口感, 由图3、4可知, C、S4和S5组质量随贮藏时间下降明显, 6d后随着品质的劣变, 部分体壁和析出的水分混合造成质量大量损失, 在15d时质量损失率分别达到54.31%、63.70%和59.89%。S1、S2和S3组样品在贮藏过程中质量总体呈缓慢下降趋势, 15d时质量损失率分别为17.20%、7.64%和12.26%, 亚高温和高温灭菌后体壁持水性更好, 质量损失率也较低。

2.3 水分含量的变化

水分含量是影响食品贮藏稳定性的重要指标^[18]。由图5可以看出, 由于即食海参样品经过了泡发基本处于水分较为饱和状态, 所有样品水分含量都较高, 贮藏过程中水分含量均在80%~90%之间。其中, C组由于液体的析出水分含量略低于其他组, 贮藏15d后水分含量降低了1.51%, 低于Liu等^[19]的研究结果(贮藏60d, 降低9.78%)。S4和S5组样品可能因为加了水的原因水分含量整体高于其他组。S2和S3组水分含量整体变化不大, 在82.98%~86.63%之间。

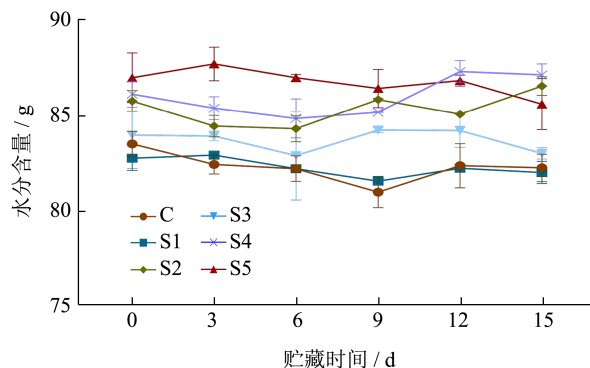


图5 不同方式灭菌即食海参25℃贮藏过程中水分含量的变化
Fig.5 Moisture content changes of instant sea cucumbers during storage at 25℃ by different sterilization methods (n=3)

2.4 pH值的变化

pH值的变化会影响蛋白质的电荷状态和构象, 从而改变产品的质地和口感。食品贮藏过程中, pH值的变化通常在开始时略微降低, 而后蛋白质分解产生含氮物质导致pH值持续升高^[20]。如图6所示, S1组pH值始终呈现缓慢下降的趋势。S3组贮藏过程中pH值最为稳定, 保持在7.18~7.44。其余组pH值均在贮藏3d时出现了较为明显的下降, 这可能是由糖原和三磷酸腺苷的分解产生乳酸和磷酸导致

的。其中 S4 和 S5 组 3 d 时下降最为明显, 分别从 8.35 和 8.45 下降到 6.39 和 6.69, 在贮藏 9 d 时体壁新鲜度下降明显, 碱性物质开始生成, pH 缓慢上升。S2 组在贮藏 3~15 d 时则较为稳定, 始终在 7.66~7.95 之间。

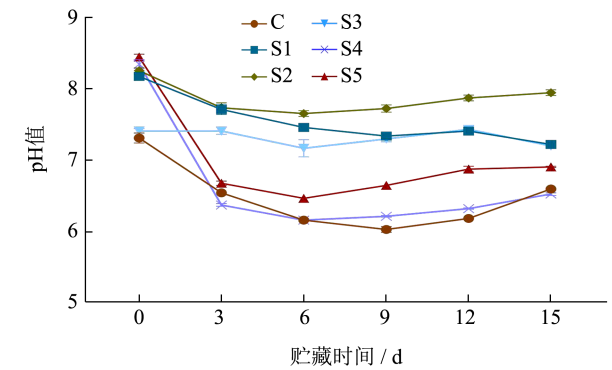


图 6 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中 pH 值的变化
Fig.6 pH value changes of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods (n=3)

2.5 菌落总数的变化

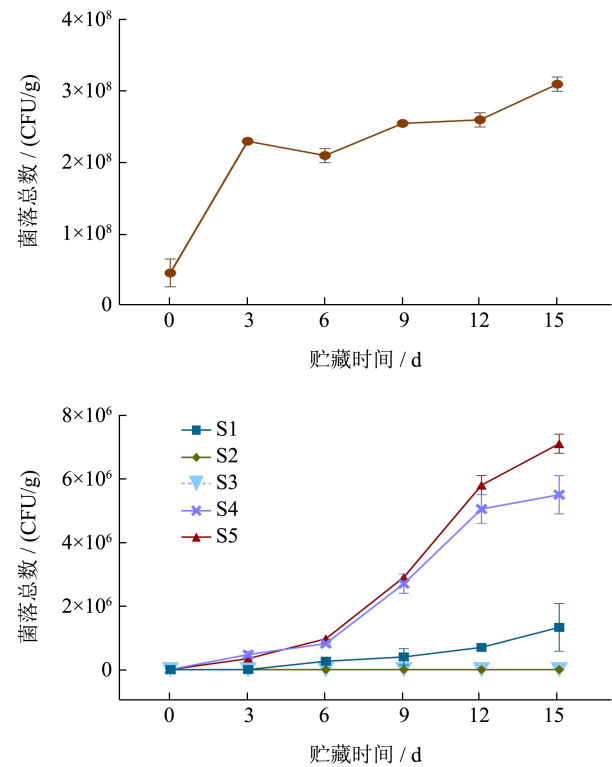


图 7 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中菌落总数的变化
Fig.7 Total number of bacterial colony change of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods (n=2)

菌落总数通常被用作判定食品被细菌污染程度

的标记, 可以通过这一方法观察细菌在食品中繁殖的动态变化^[21]。由图 7 可知, 未进行灭菌处理的海参贮藏 0 d 时菌落总数为 4.6×10^7 CFU/g, 远超出了 5×10^4 CFU/g 的标准^[22], 在贮藏过程中海参体壁附着的微生物在 25 °C 和高水分条件下生理代谢活动加快, 迅速生长, 在贮藏 15 d 时达到 3.1×10^8 CFU/g。S4 和 S5 组的菌落总数在 0 d 时维持在较低水平, 但在 3 d 后超标并继续迅速增长, 在 15 d 时分别达到 2.7×10^6 CFU/g 和 2.9×10^6 CFU/g。S1 组菌落总数在贮藏过程中呈现缓慢增加的趋势, 在贮藏到 6 d 后超出标准。S2 和 S3 组的菌落总数在整个贮藏期内均处于极低水平, 可见亚高温 (110 °C, 10 min) 和高温 (121 °C, 5 min) 灭菌能有效控制即食海参的微生物数量, 已有研究证实经充分灭菌的即食海参贮藏过程中菌落数接近于 0^[19]。

2.6 质构特性的变化

质构特性对评价水产品品质和消费者可接受度具有十分重要的意义^[23]。即食海参质构特性主要与体壁肌肉组织结构及蛋白质网络结构有关^[24]。由图 8 和 9 可知, 所有组均检测到硬度、胶黏性、咀嚼性、弹性、内聚性和回复性, C 组、S4 和 S5 组检测到粘性。不同灭菌方式处理后, 即食海参质构特性呈现明显差异。其中硬度、胶黏性、咀嚼性的变化基本趋势基本相同, C 组最高, 分别为 1 194.29、1 121.98 和 970.59 g, 低于冷藏和空气解冻即食海参的 4.48 和 2.78 kg^[25], 这可能与取样大小、测定参数及样品处理方式不同有关。其他经过热处理灭菌的样品组硬度、胶黏性和咀嚼性都有一定程度的下降。由于加热会使胶原蛋白发生凝胶化, 溶解的胶原蛋白在肌原纤维中起到润滑作用^[26], 并且随着温度和加热时间的增加, 胶原纤维不断溶解, 肌原纤维断裂, 使海参体壁进一步变软^[27]。S4 和 S5 组的硬度、胶黏性、咀嚼性略低于 C 组, 在贮藏 3 d 时迅速下降, 在 6 d 时硬度分别下降了 71.50% 和 69.22%, 高于 Sun 等^[28] 的 53.40% (37 °C, 5 d), 咀嚼性则分别降至 62.19 g 和 71.84 g, 此时的海参体壁已失去原有形态, 手指轻压即碎裂。S1 和 S2 组样品由于贮藏过程中有液体不断析出, 硬度、胶黏性、咀嚼性整体呈缓慢上升趋势, 但 S2 组在贮藏 15 d 时出现了明显的下降。S3 组在经高温高压灭菌后, 硬度、胶黏性、咀嚼性只有 C 组的 50% 左右, 但胶原蛋白凝胶对口感贡献率很大^[29], 在整个贮藏期质构都较为稳定。

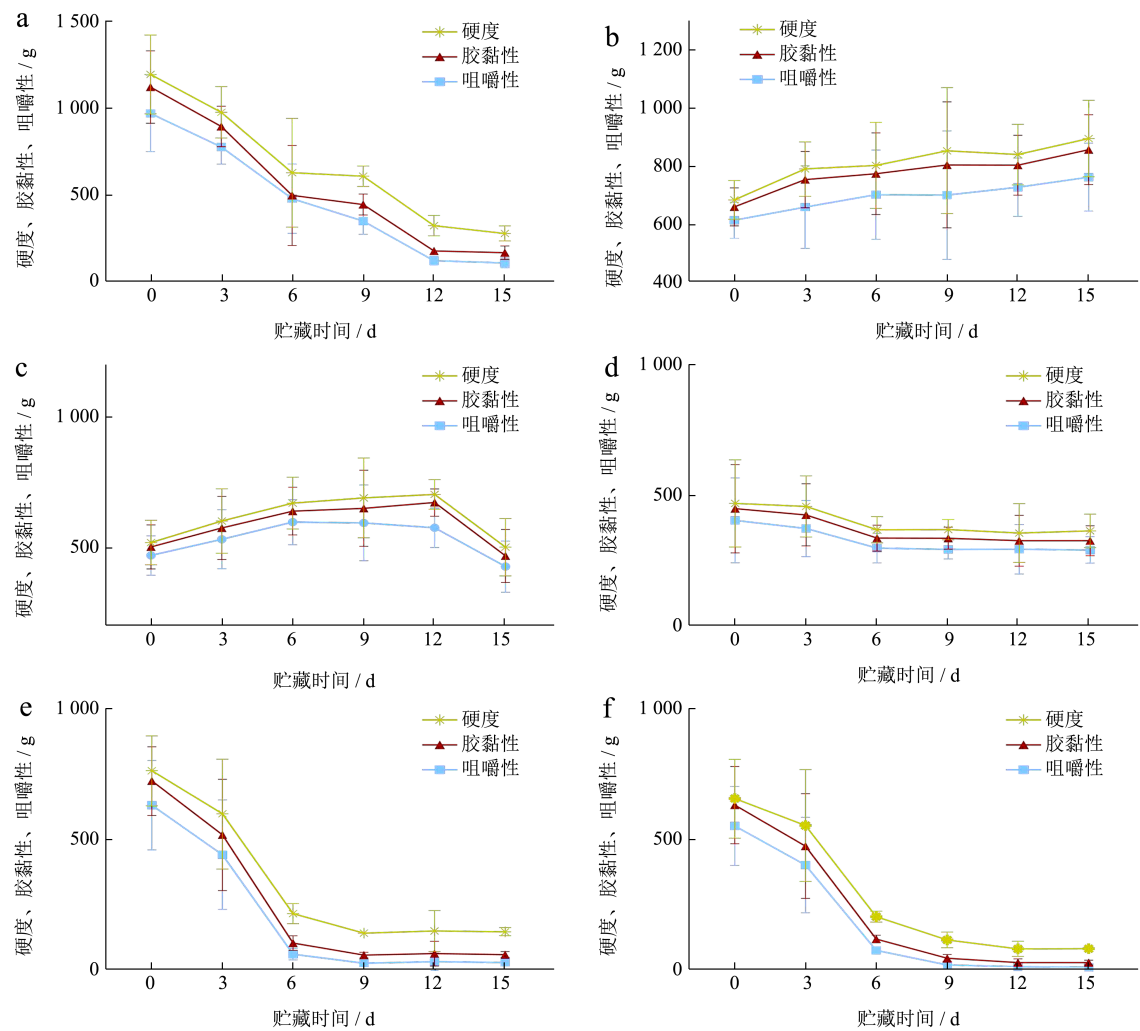
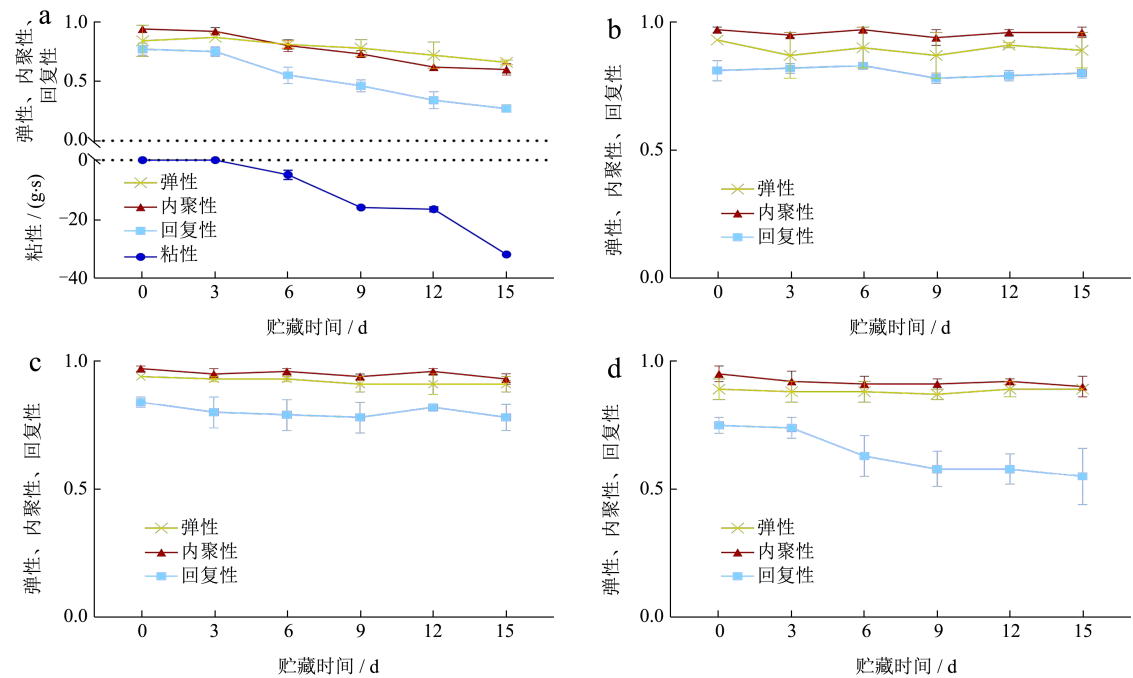


图 8 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中硬度、胶黏性、咀嚼性的变化

Fig.8 Hardness, gumminess and chewiness changes of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods ($n=6$)

注: a 为 C 组, b~f 分别为 S1~S5 组。图 9、10 同。



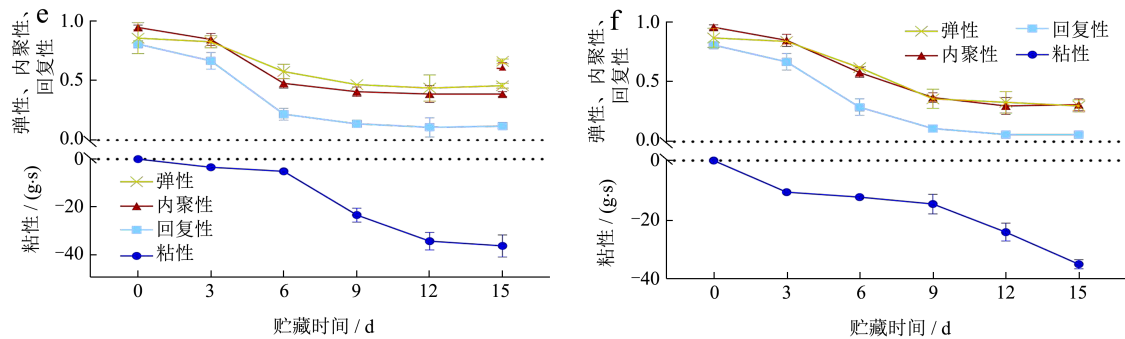


图 9 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中弹性、内聚性、回复性和粘性的变化

Fig.9 Springiness, cohesiveness, resilience and adhesiveness changes of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods (n=6)

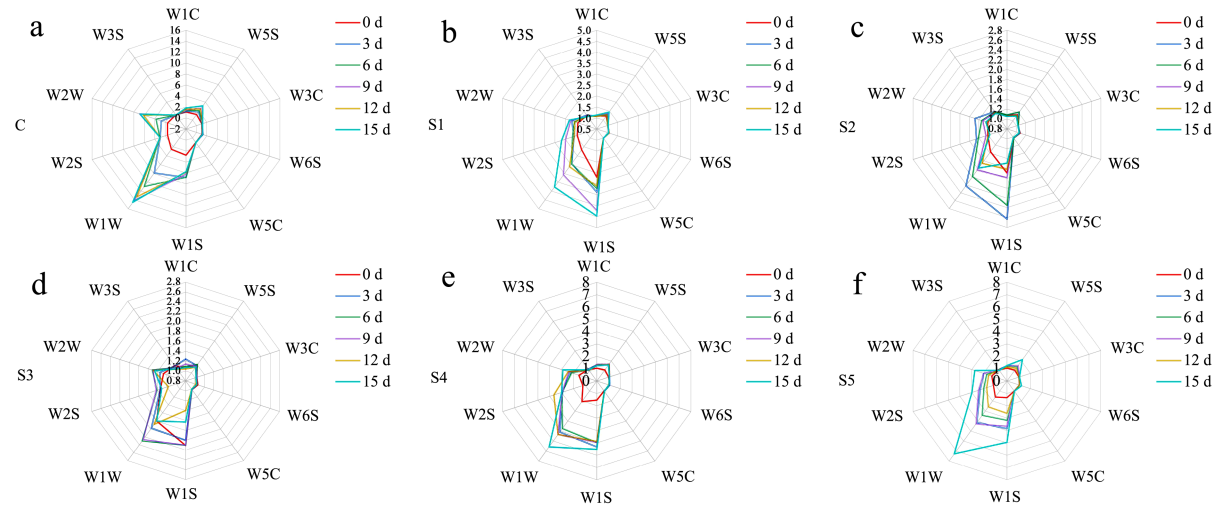


图 10 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中挥发性物质的变化

Fig.10 Volatile substances changes of instant sea cucumbers during storage at 25 °C by different sterilization methods (n=3)

注: W1C-芳香成分; W5S-氮氧化合物; W3C-芳香成分, 氨类; W6S-氢气; W5C-烷烃芳香成分; W1S-甲基类; W1W-硫化物; W2S-醇类、醛酮类; W2W-有机硫化物; W3S-烷烃。

弹性是评价海参质构的重要指标。贮藏 0 d 时, 各组样品弹性均在 80% 以上, S1 和 S2 组弹性最好, 分别为 0.93 和 0.94。C、S4 和 S5 组弹性、内聚性和回复性整体呈现缓慢下降的趋势。S1 和 S2 组弹性、内聚性和回复性在贮藏期均相对稳定。S3 组弹性和内聚性相对稳定, 但回复性在贮藏 6 d 时开始下降。S4 和 S5 组在贮藏 3 d 时开始变粘, C 组则在贮藏 6 d 时开始变粘, 且 3 组样品粘性在贮藏期内不断增加, 在 15 d 时增加到 -40 g·s 左右。

2.7 挥发性物质的变化

气味变化可作为新鲜度评价的一个直观指标^[30], 电子鼻的化学传感器和模式识别系统, 可以对贮藏过程中即食海参的气味变化进行综合评价, 有效避免人为误差。由挥发性物质的雷达图 (图 10) 可知, 10 个传感器中, W1W、W1S、W2S、W2W 和 W5S 传感器对即食海参贮藏期的气味变化较为敏感。这 5 个传感器分别对硫化物, 甲基类化合

物, 醇类、酮类, 芳香成分、有机硫化物和氮氧化合物敏感, 张涵^[31]的研究结果表明, 海参的特征香气物质主要包括 3-甲基丁醛、2-甲基丁醛等醛类, 正庚醇、正丁醇等醇类和甲苯、对二甲苯等芳香族物质。电子鼻传感器的响应值越接近 1 说明该类物质浓度越低^[32]。灭菌后, 各组响应值较为接近, 说明各组挥发性物质大致相同, 但 S4 和 S5 组响应值略低于其他组, 可能是由于水分对气味的稀释作用。S2 和 S3 组贮藏过程中响应值较低 (1.01~2.63), S1 组响应值略高于 S2 和 S3 组, 但最大响应值仅为 4.47, 可见以上 3 组在贮藏过程中气味变化不大且主要以海参特征挥发性物质甲基类化合物为主。C、S4 和 S5 组海参在贮藏初期也以特征性气味为主, 当蛋白质被微生物分解引起腐败变质时, 会产生硫化氢、甲烷、1,5-戊二胺等臭味物质, W1W 传感器数值有明显增加的趋势。贮藏 15 d 时, C 组 W1W 传感器响应值达到最高的 14.53。因此, 可以通过电子鼻 W1W 传感器的响应值来反映贮藏过程中即食海参新鲜度的变化。

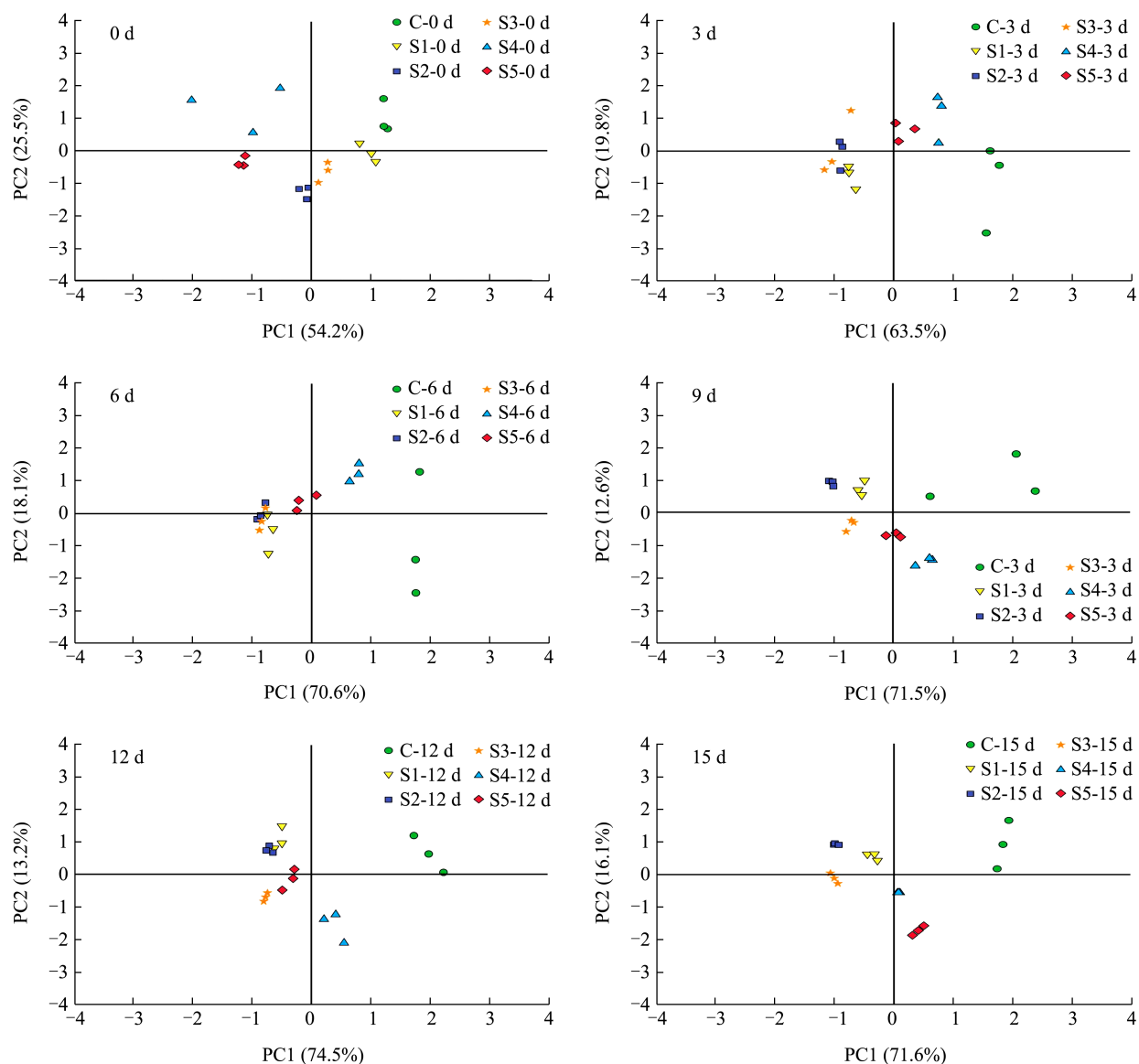


图 11 不同方式灭菌即食海参 25 °C 贮藏过程中挥发性物质 PCA 分析

Fig.11 PCA analysis of instant sea cucumbers volatile substances during storage at 25 °C by different sterilization methods ($n=3$)

为了进一步明确不同灭菌方式与贮藏过程中挥发性物质之间的关系,采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)对上述数据进行统计,结果如图 11 所示。贮藏 3 d 后,前两个主成分的累计贡献率在 83.3%~88.7%,说明这 2 个主成分能够较好的代表即食海参 25 °C 贮藏后期的主要特征气味信息,同时 PCA 可以对不同贮藏期的样品进行区分,且区分度较为明显。

2.8 微观结构的变化

采用扫描电镜观察即食海参加工及贮藏前后组

织结构的变化。图 12 为新鲜、水煮、泡发及不同灭菌条件后贮藏 0 d 和 15 d 时样品的扫描电镜观察结果。新鲜海参的纤维呈束状排列,纤维之间有较大间隙。水煮会使纤维的间隙变小,组织排列变得紧密^[33]。泡发过程中纤维吸水后会有一定程度的膨胀。随着灭菌温度的升高,纤维的凝聚作用也不断加强。C、S4 和 S5 组在贮藏后期,胶原纤维断裂,结构松散无序,发生明显的凝胶化,肌肉组织中的纤维发生变性,呈现明胶状^[23]。S1 组在贮藏 15 d 时体壁胶原纤维结构变得松散, S2 和 S3 组微观结构整体变化不大。

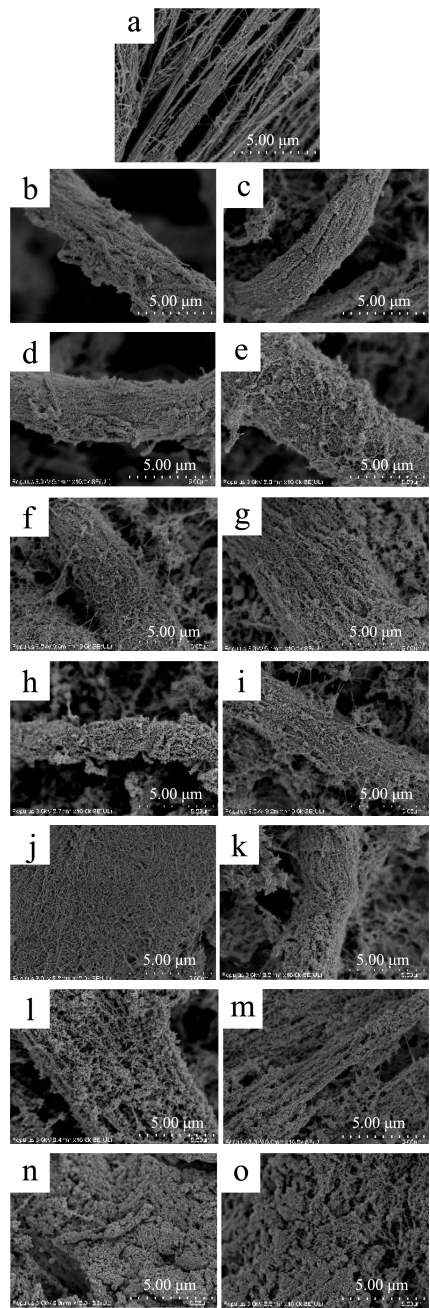


图 12 即食海参加工及 25 °C 贮藏过程中微观结构的变化 (× 10 k)

Fig.12 Microstructure changes of instant sea cucumbers during processing and storage at 25 °C (×10 k)

注：(a) 新鲜，(b) 水煮，(c) 泡发，(d) C-0 d，(e) S1-0 d，(f) S2-0 d，(g) S3-0 d，(h) S4-0 d，(i) S5-0 d，(j) C-15 d，(k) S1-15 d，(l) S2-15 d，(m) S3-15 d，(n) S4-015d，(o) S5-15 d。

3 结论

即食海参加工过程中，适当的灭菌工艺可以一定程度上延缓产品在贮藏过程中的品质劣化，提高产品的贮藏稳定性。低温（90 °C，30 min）、亚高

温（110 °C，10 min）和高温（121 °C，5 min）灭菌能有效控制即食海参的微生物数量，分别延长即食海参室温贮藏时间至 6、12 和 15 d。但在更长时间的贮藏过程中，即食海参容易发生非酶自降解，导致质构特性持续下降。自溶酶含量、可溶性蛋白含量及灭菌后有效成分的损失情况等是后续研究应关注的问题。针对这一问题，目前的研究多集中于以天然提取物作为交联剂，通过蛋白质和交联剂结合的方式来提高即食海参蛋白质的稳定性，但尚未在实际生产中广泛应用。未来关于如何进一步提高即食海参室温贮藏稳定性，做到真正的开袋即食，对于推动海参加工产业的健康快速发展具有重要意义。

参考文献

[1] RU X S, ZHANG L B, LI X N, et al. Development strategies for the sea cucumber industry in China[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2019, 37(1): 300-312.

[2] MOHSEN M, ZHANG L, SUN L, et al. Effect of chronic exposure to microplastic fiber ingestion in the sea cucumber *Apostichopus japonicas* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 209: 111794.

[3] 王慧慧,张士林,李凯,等.基于高光谱图像的即食海参新鲜度无损检测(英文)[J].光谱学与光谱分析,2017,37(11): 3632-3640.

[4] JIA A, ZHANG M, LIU X, et al. Ready-to-eat Sea Cucumber Products and Collagen Stabilization Technology [M]. Advances in Sea Cucumber Processing Technology and Product Development. Cham: Springer International Publishing, 2022: 193-227.

[5] 于笛,傅志宇,姜鹏飞,等.即食海参4 °C贮藏过程中品质变化规律[J].食品与发酵工业,2023,49(21):213-220.

[6] LI S, ZHOU Y, SUN L, et al. Effects of storage method on the quality of processed sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*) [J]. Foods, 2022, 11(24): 4098.

[7] XIN X, BAO Y H, DI J, et al. .Postmortem biochemical and textural changes in the sea cucumber *Stichopus japonicus* body wall (SJBW) during iced storage [J]. LWT, 2020, 118: 108705.

[8] 赵园园,薛勇,李兆杰,等.即食仿刺参的制备与常温贮藏期间品质变化研究[J].食品工业科技,2015,36(11):305-308.

[9] 袁文鹏,刘昌衡,孟秀梅,等.不同杀菌方式对即食海参品质影响的分析[J].中国食品工业,2008,12:54-55.

[10] GB4789.2-2022,食品安全国家标准 食品微生物学检验菌落总数测定[S].

[11] GB5009.237-2016,食品安全国家标准 食品pH值的测定[S].

- [12] 于笛,方梓莹,傅志宇,等.金银花、三七和蛹虫草提取物对即食海参品质变化影响的研究[J].食品安全质量检测学报,2022,13(24): 7899-7908.
- [13] 李思懿,粘颖群,谭建庄,等.基于电子鼻快速检测生鲜猪肉的异味[J].食品工业科技,2023,44(20):338-348.
- [14] DONG X F, SHEN P, YU M Q, et al. (-)-Epigallocatechin gallate protected molecular structure of collagen fibers in sea cucumber *Apostichopus japonicus* body wall during thermal treatment [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 123: 109076.
- [15] 胡顺.牛骨胶原蛋白酶解物制备及其生理活性研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [16] 王义轩.海参加工、贮藏过程中品质变化及消化产物蛋白质组学研究[D].大连:大连海洋大学,2022.
- [17] CHEN T, PENG Z, LU J, et al. Self-degradation of sea cucumber body wall under 4℃ storage condition [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40(4): 715-723.
- [18] 陈婵,黄靖.抹茶对贮藏期间薏仁米脂质氧化的影响[J].食品与机械,2024,40(1):140-144.
- [19] LIU Z, LI D, SONG L, et al. Effects of proteolysis and oxidation on mechanical properties of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) during thermal processing and storage and their control [J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127248.
- [20] 赵钜阳,孙昕萌,李越,等.儿茶素对虾滑贮藏和食用品质的影响[J].食品与生物技术学报,2023,42(5):35-42.
- [21] 郑稳,庄文静,宫萱,等.冷藏和微冻贮藏对大口黑鲈鱼品质的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(5): 218-225.
- [22] GB 10136-2015,食品安全国家标准 动物性水产制品[S].
- [23] 李桢桢,尹明雨,王锡昌.冷链流通中温度波动对冷冻南美白对虾持水性及质构特性的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(5):208-217.
- [24] 王源渊,尚珊,黄旭辉,等.冷冻贮藏过程中烤黑鱼的品质变化[J].食品研究与开发,2024,45(2):7-13.
- [25] 葛小通,王红丽,尹明雨,等.冷冻即食海参质构特性指标的相关性研究[J].中国食品学报,2023,23(1):326-334.
- [26] ZHANG Q, LIU R, GEIRSDÓTTIR M, et al. Thermal-induced autolysis enzymes inactivation, protein degradation and physical properties of sea cucumber, *Cucumaria frondosa* [J]. Processes, 2022, 10(5): 847.
- [27] GAO F, XU Q, YANG H S. Seasonal biochemical changes in composition of body wall tissues of sea cucumber *Apostichopus japonicas* [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(2): 252-260.
- [28] SUN X, ZHU L, QI X, et al. Cleavage sites and non-enzymatic self-degradation mechanism of ready-to-eat sea cucumber during storage [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131722.
- [29] ZHANG K, HOU H, BU L, et al. Effects of heat treatment on the gel properties of the body wall of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54: 707-717.
- [30] 刘琳,焦文娟,赵甜甜,等.电子鼻结合生物胺分析淡水鱼贮藏过程中的品质变化[J].现代食品科技,2024,40(1): 137-148.
- [31] 张涵.海参与其发酵制品风味构成研究[D].大连:大连工业大学,2017.
- [32] KARAKAYA D, ULUCAN O, TURKAM M. Electronic nose and its applications: A survey [J]. International Journal of Automation and Computing, 2020, 17(2): 179-209.
- [33] RIYANTO B, RAMADHAN W, MOESRIFFAH R. Effect of ultrasound assisted rehydration on the quality of dried sea cucumber [J]. Fisheries and Aquatic Sciences, 2023, 26(9): 535-547.