DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260125001
引用格式: 张旭, 侯宇佩, 张文宇, 等. 盐渍海参煮制过程熟化程度的力学特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 161–170.
Zhang Xu, Hou Yupei, Zhang Wenyu, et al. Analysis of mechanical properties of cooking degrees of salted *Apostichopus japonicus* during cooking [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 161–170. (in Chinese with English abstract).

盐渍海参煮制过程熟化程度的力学特性分析

张 旭[1], 侯宇佩[1], 张文宇[1], 崔佳鹏[1], 隋倩倩[1], 焦 健[2], 王慧慧[1,3*]

[1. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 大连 116034; 2. 北京同仁堂健康(大连)海洋食品有限公司, 大连 116052; 3. 大连工业大学海洋食品加工与安全控制全国重点试验室, 大连 116034]

摘 要: 目的 通过力学特性分析盐渍海参煮制过程熟化程度。**方法** 以大连仿刺参盐渍原料为研究对象, 依据感官评定将其分为对照组(未煮制)、三成熟、五成熟、七成熟、全熟及过熟 6 个熟度等级, 通过拉伸与压缩试验测定其弹性模量、刚度、变形能等力学参数, 并基于实测参数构建三维有限元模型模拟人工触压过程。**结果** 随煮制熟度增加, 海参体壁弹性模量由对照组的(1.024±0.110)×10^5 Pa 显著下降至全熟组的(0.210±0.020)×10^5 Pa, 过熟组进一步降至(0.136±0.020)×10^5 Pa, 降幅分别达 79.49%与 86.72%; 煮制初期(对照组至三成熟)的刚度与变形能降幅尤为显著(分别达 75.12%和 44.08%)。有限元模拟结果显示, 在相同压缩位移下, 海参体壁最大等效应力随煮制熟度提高而降低, 与弹性模量变化趋势一致, 且模拟与试验力-位移曲线吻合良好(最大相对误差小于等于三成熟 6.09%)。相关性分析表明, 熟度与弹性模量、最大压缩反力呈极显著负相关(P<0.01)。**结论** 本研究证实弹性模量可作为表征海参煮制熟度的关键量化指标, 为开发基于力学响应的海参煮制熟度快速、无损智能检测技术提供了理论依据与数据支撑。

关键词: 海参; 煮制熟度; 力学特性; 弹性模量; 有限元分析; 熟度判别
中图分类号: TS254.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0161–10

Analysis of mechanical properties of cooking degrees of salted *Apostichopus japonicus* during cooking

ZHANG Xu[1], HOU Yu-Pei[1], ZHANG Wen-Yu[1], CUI Jia-Peng[1], SUI Qian-Qian[1], JIAO Jian[2], WANG Hui-Hui[1,3*]

[1. *College of Mechanical Engineering and Automation*, *Dalian Polytechnic University*, *Dalian* 116034, *China*; 2. *Beijing Tongrentang Health* (*Dalian*) *Marine Food Co*., *Ltd*., *Dalian* 116052, *China*; 3. *State Key Laboratory of Marine Food Processing and Safety Control*, *Dalian Polytechnic University*, *Dalian* 116034, *China*]

ABSTRACT: Objective To analyse cooking degree of salted *Apostichopus japonicus* during cooking process by mechanical property characteristics. **Methods** Taking salted raw *Apostichopus japonicus* from Dalian as research objects, they were classified into 6 cooking degree grades via sensory evaluation, namely control group (uncooked), 30% cooked, 50% cooked, 70% cooked, fully cooked and overcooked. Tensile and compression tests were conducted to

收稿日期: 2026-01-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2101200)
第一作者: 张旭(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品机械。E-mail: zhangxu@dlpu.edu.cn
***通信作者:** 王慧慧(1982—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品机械。E-mail: whh419@126.com

determine mechanical parameters such as elastic modulus, stiffness and deformation energy. A 3-dimensional finite element model was established based on the measured parameters to simulate the manual pressing process. **Results** With the increase of cooking degrees, the elastic modulus of *Apostichopus japonicus* body wall decreased significantly from (1.024±0.110)×10^5 Pa in the control group to (0.210±0.020)×10^5 Pa in the fully cooked group, and further dropped to (0.136±0.020)×10^5 Pa in the overcooked group, with a reduction of 79.49% and 86.72%, respectively. Stiffness and deformation energy decreased most significantly during the early cooking stage (from the control to 30% doneness), with reductions of 75.12% and 44.08%, respectively. The finite element simulation results indicated that under the same compression displacement, the maximum equivalent stress of *Apostichopus japonicus* body wall decreased with the rise of cooking degree, which was consistent with the variation trend of elastic modulus. Moreover, the simulated force-displacement curves were in good agreement with the experimental ones, with the maximum relative error less than 6.09%. Correlation analysis revealed that cooking degree was extremely significantly negatively correlated with elastic modulus and maximum compressive reaction force (P<0.01). **Conclusion** This study verifies that elastic modulus can serve as a core quantitative index to characterize the cooking degrees of *Apostichopus japonicus*s, which provides theoretical basis and data support for the development of rapid, non-destructive and intelligent detection technology for *Apostichopus japonicus* cooking degree based on mechanical response.

KEY WORDS: *Apostichopus japonicus*; cooking degrees; mechanical properties; elastic modulus; finite element analysis; cooking maturity discrimination

0 引 言

海参蛋白质含量高，维生素和微量成分含量丰富，是优良的保健食材[1]。我国作为全球唯一的海参养殖与加工大国，随着市场需求扩大及消费者对品质要求的提升，实现海参加工的标准化、规模化成为行业发展的必然趋势[2]。盐渍海参在加工过程中需经煮制、泡发、调味或干燥等工序，由于蛋白质、水分以及组织结构上存在个体差异，即使在同一煮制工艺和时间下，海参的熟化品质仍表现为较大分散性[3]。煮制不足会导致海参体壁胶原蛋白变性不充分，质地紧实、韧性过强，不仅延长后续泡发时间，还易造成泡发不均、口感偏硬[4]；而过度熟化则会引起胶原结构断裂水解，导致体壁松散、弹性丧失、营养成分流失，严重降低产品附加值[5]。目前，生产中常采用人工触压法判别煮制熟度：即将海参捞出后凭经验按压，挑出已熟化的个体，余者继续煮制。该方法是影响海参产品口感与品质的核心工艺质量控制环节，但存在依赖主观经验、劳动强度大、效率低下、易出现感官疲劳等问题，难以满足规模化加工中对稳定性和一致性的要求。因此，实现海参煮制熟度的快速、客观、量化检测，已成为行业亟待解决的技术需求。

煮制过程中，海参体壁蛋白质变性与水分迁移共同导致其组织结构发生改变[6−7]，进而引起力学特性的系统性变化[8]。人工触压法所依赖的“手感”差异，本质上反映了不同煮制熟度海参在弹性模量等材料属性上的差异。因此，通过力学测试捕捉这种差异，是实现熟度智能判别的物理基础。弹性模量作为表征生物材料力学行为的关键参数，可通过质构仪测得，并为有限元仿真提供材料属性输入[9]。针对番茄[10]、苹果[11]和西瓜[12]建立的压缩仿真模型，能定量揭示食品损伤程度、能量吸收与压缩力、位移之间的关系。而对花生米[13]、冬枣[14]及皇冠梨[15]的压缩试验与有限元分析进一步显示，弹性模量、内部应力以及破损力等力学参数的变化，可用于预测和识别食品的含水率、成熟度以及机械损失状态。上述研究表明，食品材料的弹性模量等关键参数与其物理状态之间存在明确的量化关联。热加工过程会引起食品组织内部结构的改变，并在宏观层面体现为材料属性的相应变化。例如，腌鳕鱼在煮制过程中弹性模量呈规律性下降[16]；针对肉类煮制过程建立的各向异性大变形有限元模型，成功模拟了微观结构演变对宏观力学行为的影响[17]。不同熟度食品材料力学参数的差异，必然导致其宏观力学响应的差异，这为基于力学检测的热加工熟度判别提供了理论依据。因此，明确海参煮制熟度与其力学参数之间的关联关系，进而通过力学检测实现熟度判别，具有充分的理论依据与方法可行性。

这些研究均表明，生物材料的力学特性与其物理状态(如含水量、成熟度)存在明确关联，且有限元法能够有效模拟其在外载荷作用下的力学响应，这为通过力学参数反推材料状态提供了可靠路径。因此，采用试验与仿真相结合的方法，系统分析海参煮制过程中力学特性的演变规律，进而探索盐渍海参在煮制过程熟化程度与力学指标之间的量化关系，具有充分的理论依据与方法可行性。

为此，本研究以盐渍海参为对象，通过感官评定划分熟度等级，开展拉伸与压缩力学试验，获取不同熟度海参的弹性模量、刚度、变形能等参数，基于试验数据构建海参三维有限元模型，模拟人工触压过程，分析其应力应变分

布规律, 旨在阐明煮制熟度与海参体壁力学特性之间的量化关系, 为开发海参熟度无损、快速检测技术提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

大连仿刺参(*Apostichopus japonicus*)盐渍原料选自辽宁省大连市海参加工企业。试验样品在企业生产现场同一批次盐渍海参原料煮制过程中随机选取, 共选取 60 只体壁完整无破损的个体作为试验样本, 经统计海参单体重约(12.0±1.2) g、体长(55.0±5.3) mm、高(16.0±1.5) mm、宽(20.0±2.1) mm。

1.2　仪器与设备

TMS-PRO 型质构仪(配有触压探头, R=5 mm 球形, 美国 FTC 公司); 530-312 游标卡尺(量程 0~150 mm, 精度 0.02 mm, 三丰精密仪器有限公司); i2000 厨房秤(精度 0.1 g, 永康市皓然衡器有限公司); ZRJX-300 多功能搅拌蒸煮锅(诸城市中润有限公司); EW300 温度计(量程 0~100 ℃, 郑州云湛科技有限公司); J01205 机械停钟(精度 0.2 s, 上海天大科教器材有限公司)。

1.3　试验样本制备

生产企业某批次盐渍海参原料煮制的一般生产流程为: 批次海参原料在 85 ℃恒温条件下进行煮制, 煮制过程中间隔一定时段将所有海参物料捞出, 经过冷水过冷或冲洗处理, 使其温度降至 40~50 ℃, 将已熟化的海参个体挑出, 剩余的海参物料再次进行恒温煮制, 并重复上述工艺, 直至所有海参原料完成熟化。

为了研究熟化过程海参力学特性的变化规律, 本研究将海参的熟度定义为: 三分熟、五分熟、七分熟、全熟、过熟等 5 个等级, 以未经煮制的海参作为对照组, 选取硬度、弹性等指标作为盐渍海参感官评价的核心维度, 制定对应的感官评价标准表(表 1)。对不同熟度的盐渍海参样品进行编码处理, 邀请 10 名年龄介于 22~25 岁、经系统训练的感官员(男女各 5 名), 对编码后的样品进行盲评, 重复两次。试验样本选取的过程如下: 在某批次原料煮制之前, 选取 10 只样本作为对照组; 设置煮制全程时间为 150 min, 煮制过程中每间隔 10 min 随机捞出 20 只海参, 每次整体捞出后, 依据表 1 的感官评定标准进行逐只判别分级, 从各次捞出的物料中分别筛选出对应 5 个煮制熟度的个体, 最终选取各熟度等级样本各 10 只; 所选海参立即投入冰水浴(0~4 ℃)快速冷却 10 min, 用滤纸吸干表面水分。

1.4　试验方法

1.4.1　海参样条拉伸试验

海参生物体内部体壁和纵肌等多层组织协同作用, 共同赋予其整体弹性[18]。为获取海参材料本征弹性参数, 本研究将体壁与纵肌视为整体连续弹性体, 制备标准样条进行拉伸试验。试验前, 选取对照组、三成熟、五成熟、七成熟、全熟、过熟 6 种不同熟度海参各 5 只, 所有试样均统一取自海参腹部中段区域, 该部位体壁厚度均匀, 可最大程度消除解剖位置差异对力学测试的影响。制备规格为 50 mm×5 mm×5 mm 的条状试样, 该尺寸既覆盖了各熟度海参腹部中段可获取的有效长度范围, 又能保证拉伸试验标距段均匀受力, 同时避免因试样过薄导致的夹持损伤。操作中轻缓处理, 注意保持试样完整, 避免机械损伤。

表 1　煮制后不同熟度海参的感官评定

Table 1　Sensory evaluation of *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees

熟度	感官评定
对照组	体壁触感坚硬致密, 触压时整体软硬度基本一致、弹性强且瞬时回弹
三成熟	体壁触感较坚硬, 触压时外部稍软、内部较硬、弹性较强且回弹较快
五成熟	体壁触感偏软, 触压时内外质地明显不均、有较大硬芯、弹性一般且回弹较快
七成熟	体壁触感较软, 触压时内外质地较不均、有较小硬芯、弹性偏弱且回弹偏慢
全熟	体壁触感软嫩, 触压时内外质地均匀、无硬芯、弹性弱仅回弹较慢
过熟	体壁触感绵软, 触压时内外质地均匀、无硬芯、弹性微弱且回弹慢

弹性材料在受力初期的线性阶段能较好反映其弹性本构关系[19]。基于此, 采用 TMS-PRO 型质构仪及其配套钢制夹具对试样进行纵向拉伸测试(图 1)。设定夹具拉伸速度为 2 mm/s, 最大拉伸变形量为 10 mm。试验过程中, 系统自动记录载荷与变形数据, 并实时保存至计算机。通过分析所得力-变形曲线, 结合胡克定律计算弹性模量, 从而表征不同熟度海参的弹性特性。每种熟度试样在相同试验条件下重复测定 5 次, 以确保结果的可靠性和重复性。

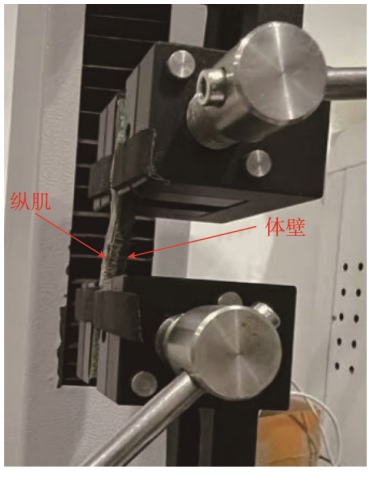


图 1　海参样条拉伸试验

Fig.1　Tensile test of *Apostichopus japonicus* spline

1.4.2 海参整体压缩试验

为模拟人工触压判别海参熟度的实际过程并获取海参整体压缩的力学响应特征, 采用质构仪球形探头对海参样本进行压缩试验(图 2)。试验对象包括对照组及三成熟、五成熟、七成熟、全熟、过熟共 6 组不同熟度海参, 每组 5 只。将探头以 10 mm/min 的恒定速度垂直下压至海参背部中间无刺区域, 初始触发力设为 0.05 N, 最大压缩位移设定为 5 mm, 记录并导出压缩力-位移曲线。该曲线反映了不同熟度海参在模拟触压条件下的整体力学行为, 为分析其触压海参的宏观力学响应与其熟度之间的关联提供数据基础。



图 2 海参整体压缩试验

Fig.2 Compression test on the whole *Apostichopus japonicus*

1.4.3 指标计算

对拉伸海参样条试验得到的数据进行处理, 依据胡克定律去测量海参的弹性模量, 用公式(1)计算不同熟度海参的弹性模量[20–21]。

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{F\times L}{A\times \Delta L} \tag{1}$$

式中: E 为弹性模量, Pa; σ 为拉伸样本产生的应力, Pa; ε 为沿拉伸方向的变形率; F 为拉伸产生的应力, N; A 为样本横截面积, mm^2; L 为夹具间样本长度, mm; ΔL 为样本伸长量, mm。

将不同熟度的海参各 10 只, 分别称取其质量, 然后运用排水法计算出 60 只海参的体积, 计算出不同熟度海参密度取平均值, 其计算如公式(2)、(3)所示。

$$\Delta V=V_1-V_0 \tag{2}$$

$$\rho=\frac{m}{v} \tag{3}$$

式中: ΔV 为试样的体积, cm^3; V_1 为试样置于容器时水和海参的体积, cm^3; V_0 为未放入海参时容器中水的体积, cm^3; ρ 为密度, g/cm^3; m 为质量, g, v 为体积, cm^3。

刚度值可表示为力-变形曲线上任意点处力 F 对变形量 S 的一阶导数[22], 计算如公式(4)所示。

$$K=\frac{dF}{dS} \tag{4}$$

式中: K 为刚度, N/mm; F 为外部施加载荷, N; S 为变形量, mm。

变形能为从开始压缩到发生一定变形过程中材料所吸收的能量, 其值为压缩力-变形曲线在对应变形阶段与横坐标轴围成的面积[23], 计算如公式(5)所示。

$$U=\int_0^{x_{\max}} F(x)dx \tag{5}$$

式中: U 为变形能, N • mm; x_{max} 为触压过程中设定的最大变形位移, mm; $F(x)$为触压位移为 x 时的实时压力, N。

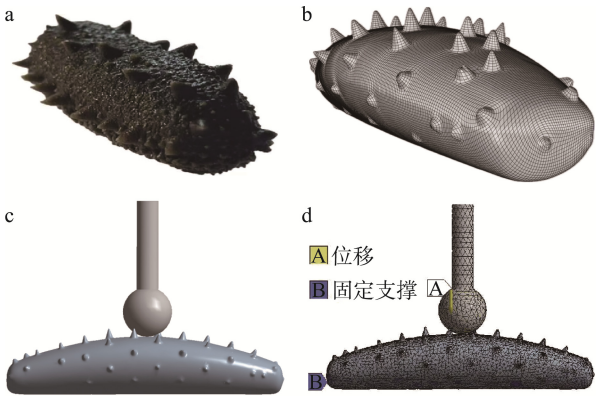
1.4.4 海参整体压缩的有限元分析

盐渍加工后的海参原料肉质收缩, 由体壁围合的内部腔体会被压紧至无空腔或极小空腔的状态, 盐渍海参原料设定为均质线弹性连续介质。海参整体压缩有限元仿真的基本假设为, 设定海参压缩时的初始应力为零, 海参整体含水率和温度分布均匀, 且不随受力过程变化[24], 忽略结构所受惯性、阻尼等影响, 仅考虑外力作用, 当海参产生弹性变形时, 力与位移满足[25], 计算如公式(6)所示。

$$[K]\{U\}=\{F\} \tag{6}$$

式中: $[K]$为物体的刚度矩阵; $\{U\}$为物体节点的位移; $\{F\}$为物体的外部载荷。

如图 3 所示, 首先从整体压缩试验样本中随机选取海参个体, 基于其实际尺寸, 利用 Rhino7-Grasshopper (版本号 SR38)软件建立三维几何模型。将该模型导入 ANSYS Workbench 2023 R1 中, 并与质构仪球形探头(r=5 mm)进行装配, 探头定位于海参背部中部无刺区域上方。接触属性设置为有摩擦接触, 摩擦系数为 0.3。材料参数依据拉伸试验结果确定: 通过公式(1)计算得到不同熟度海参的弹性模量; 泊松比参考生物软组织相关研究, 该类组织泊松比通常介于 0.40~0.49 之间[26], 本研究取中间值 0.45[27–28]。对装配体进行网格划分, 采用四面体单元, 对海参底面施加固定支撑, 在探头表面施加与实物试验一致的位移载荷(压缩位移 5 mm, 加载速率 10 mm/min), 开展不同熟度海参整体压缩的有限元仿真, 以分析其应力、应变分布及宏观力学响应。



注: a. 海参实体; b. 海参三维模型; c. 装配体模型; d. 网格划分及加载方式。

图 3 海参的三维模型

Fig.3 The 3 dimensional model of *Apostichopus japonicus*

1.5　数据处理

采用 SPSS 26 进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)与显著性分析, Oringin Pro 2021 进行误差分析并拟合力-位移曲线, WorkBench 2023 进行有限元仿真模拟, 每种熟度试样在相同试验条件下重复测定 5 次。

2　结果与分析

2.1　力学特性试验结果与分析

2.1.1　弹性模量变化规律

如图 4 所示, 随煮制熟度增加, 海参样条拉伸力-位移曲线呈近似线性, 表明盐渍海参符合弹性材料特征。不同煮制熟度海参弹性模量计算结果及其方差分析如表 2、表 3 所示, 从对照组到过熟组, 弹性模量值明显下降, 全熟组与过熟组较对照组分别降低 79.49%和 86.72%。这主要归因于煮制热处理导致胶原蛋白逐步变性[29–30], 试验中弹性模量随熟度升高显著降低的变化规律与 Liu 等[29]报道的海参在热加工过程中弹性、硬度逐渐下降的流变特性变化趋势相一致, 与 Wang 等[29]关于热处理会显著改变海参体壁力学性能的研究结论相吻合, 说明不同熟度带来的弹性模量差异具有普遍规律性。随着胶原蛋白三级结构不断发生断裂, 氢键等分子间作用力被破坏, 原本质密紧实的体壁结构变得疏松多孔, 材料抗变形能力亦随之下降[31]。弹性模量可作为表征海参煮制熟度的关键量化指标。

2.1.2　整参压缩力学响应

图 5 为不同熟度整参样本在 10 mm/min 匀速压缩(最大压缩量 5 mm)下的力-位移曲线, 试验数据重复性良好。为系统描述曲线特征, 对各熟度组随机选取一条力-位移数据进行非线性拟合[32], 采用如式(7)所示的三次多项式模型[33], 拟合结果如图 6 所示。

$$F(x)=ax+bx^2+cx^3+d \tag{7}$$

式中: $F(x)$为压缩力, N; x 为压缩位移, mm; a、b、c 分别为一次项、二次项、三次项拟合系数; d 为拟合截距, N。

方差分析表明(表 4), 熟度对触压反力具有极显著影响(P<0.01)。各曲线决定系数 r^2 均大于 0.998, 拟合系数详见表 5。

基于压缩的力-位移拟合曲线, 刚度、变形能计算公式如公式(8)、(9)所示, 结果如图 7 所示。

$$K=a+2bx+3cx^2 \tag{8}$$

$$U=\int_0^{x_{\max}}(ax+bx^2+cx^3+d)dx \tag{9}$$

式中: K 为海参压缩刚度, N/mm; x 为压缩位移, mm; a、b、c 分别为力-位移拟合曲线中的一次项、二次项、三次项拟合系数; d 为拟合截距, N; U 为压缩变形能, N·mm; $x_{\max}$ 为最大压缩位移, mm。

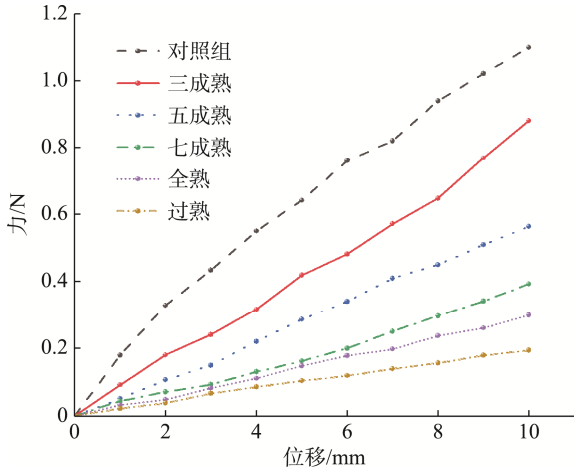


图 4　不同熟度的海参样条拉伸的力-位移曲线

Fig.4　Force-displacement curves of *Apostichopus japonicus* splines with different cooking degrees under tension

表 2　不同熟度海参弹性模量

Table 2　Elastic modulus of *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees

熟度	弹性模量/Pa
对照组	(1.024±0.110)×10^5
三成熟	(0.649±0.080)×10^5
五成熟	(0.375±0.030)×10^5
七成熟	(0.284±0.030)×10^5
全熟	(0.210±0.020)×10^5
过熟	(0.136±0.020)×10^5

表 3　海参熟度对弹性模量的显著性分析

Table 3　Significance analysis of the cooking degrees of *Apostichopus japonicus* on its elastic modulus

指标	III类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	14786844000.00	5	2957368800.00	123.68	**
截距	1038562800000.00	1	1038562800000.00	4362.15	**
熟度	14786844000.00	5	2957368800.00	123.68	**
误差	574272000.00	24	23928000.00		
总计	1186325640000.00	30			
修正后总计	15361116000.00	29			

注: **为极显著差异(P<0.01), 表 4、6 同, 调整后的决定系数 r^2=0.956。

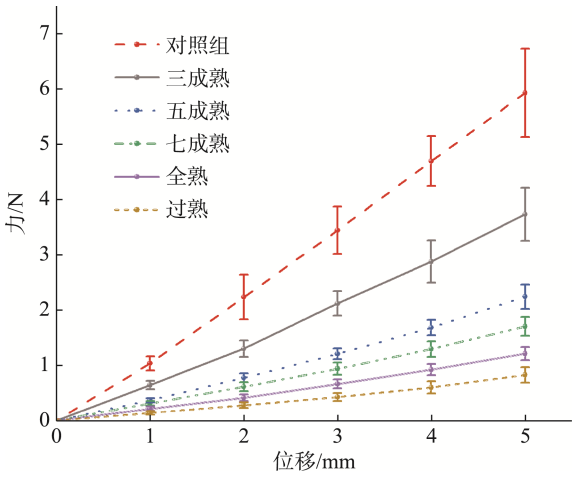


图 5 不同熟度海参整参压缩的力-位移曲线

Fig.5 Force-displacement curves of whole *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees under compression

如图 7 所示，随着煮制熟度增加，刚度和变形能均呈下降趋势。对照组刚度为 2.01 N/mm，变形能为 14.42 N • mm；三成熟组刚度降至 0.50 N/mm，变形能降至 7.94 N • mm，分别较对照组下降 75.12%和 44.08%；继续提高熟度至过熟组，刚度与变形能进一步降低至对照组的 92.54%和 87.38%。值得注意的是，海参煮制初期(从对照组至三成熟组)刚度和变形能的下降幅度显著大于后续熟化阶段。

该结果与相关研究结论一致：Zhang 等[34]指出，煮制加热会引起海参体壁水溶性蛋白逐层变性，破坏胶原纤维网络结构的完整性，从而削弱其抗变形能力和能量吸收能力；Birenheide 等[35]亦证实，海参体壁刚度受结缔组织与活性肽共同调控，高温可干扰活性肽的调控作用，进一步降低刚度，而刚度的变化又直接影响变形能的数值。上述机制共同解释了本研究中海参刚度和变形能随熟度增加而逐步降低的现象。

2.1.3 力学参数相关性分析

利用 SPSS 26 软件进行海参熟度与各力学参数的相关性分析，结果如表 6 所示。熟度与弹性模量、最大压缩反力均呈极显著负相关(P<0.01)，海参熟度提升，弹性模量与最大压缩反力均呈显著下降趋势；弹性模量与最大压缩反力、刚度均呈极显著正相关(P<0.01)，弹性模量越高，海参的最大压缩反力与刚度随之增大。最大压缩反力与刚度呈极显著正相关(P<0.01)，表明二者的变化趋势高度一致。

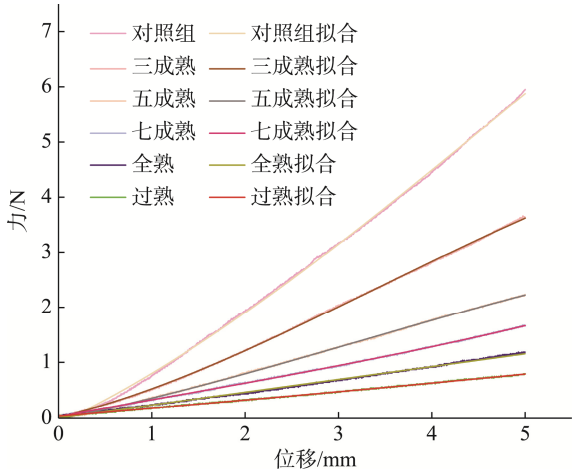


图 6 不同熟度海参整参压缩的力-位移拟合曲线

Fig.6 Force-displacement fitting curves of whole *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees under compression

表 4 海参熟度对触压反力的显著性分析

Table 4 Analysis of the significance of *Apostichopus japonicus* ripeness on contact pressure reaction force

指标	III类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	92.490	5	18.498	115.01	**
截距	207.176	1	207.176	1287.98	**
熟度	92.490	5	18.498	115.01	**
误差	3.860	24	0.161		
总计	303.526	30			
修正后总计	96.350	29			

注：调整后的 r^2=0.948。

表 5 不同熟度海参整参压缩试验拟合曲线

Table 5 Fitting curves of *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees under compression test

熟度	拟合系数				r^2
	a	b	c	d	
对照组	0.77729	0.12797	–0.00089	–0.09869	0.99953
三成熟组	0.39615	0.12541	–0.01206	0.01240	0.99979
五成熟组	0.32904	0.04811	–0.00487	–0.01682	0.99960
七成熟组	0.30238	–0.00523	0.00202	0.02640	0.99966
全熟组	0.19141	0.00825	–0.00009	0.03291	0.99946
过熟组	0.14175	0.00081	0.00022	0.03410	0.99886

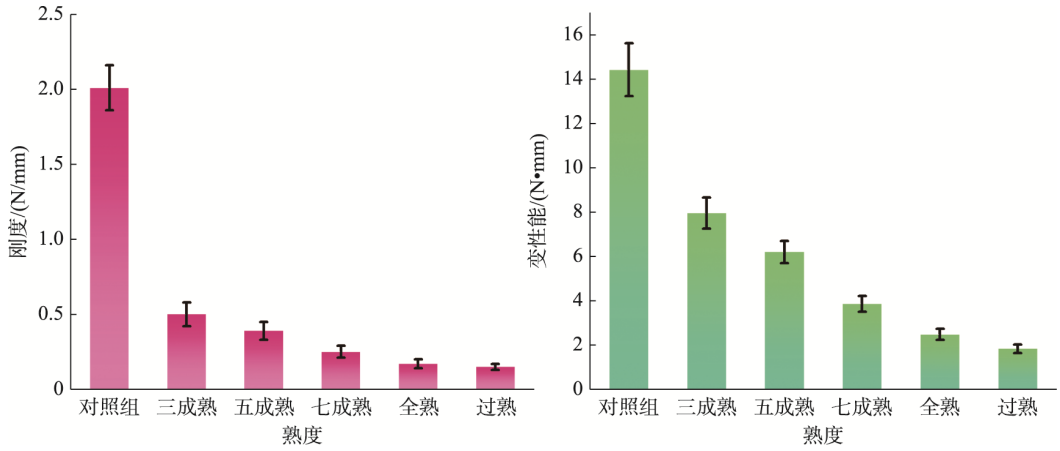


图 7　海参的刚度与变形能随熟度的变化

Fig.7　Variation of stiffness and deformation energy of *Apostichopus japonicus* with cooking degrees

表 6　熟度、弹性模量、最大压缩反力、刚度及变形能间相关性分析

Table 6　Correlation analysis of cooking degrees, elastic modulus, maximum compressive reaction, stiffness and deformation energy

参数	熟度	弹性模量	最大压缩反力	刚度	变形能
熟度	1.000	–0.920**	–0.919**	–0.769	–0.356
弹性模量		1.000	0.984**	0.932**	0.150
最大压缩反力			1.000	0.930**	0.154
刚度				1.000	0.092
变形能					1.000

2.2　有限元仿真结果与分析

2.2.1　仿真计算

从海参整体压缩试验样本中随机选取单个样本, 经测量, 海参长为52 mm, 高为16 mm, 刺的高度为0.4~2.2 mm, 根据测量尺寸在Rhino7 (SR38) -Grasshopper中建立海参三维模型。质构仪球形探头尺寸为 r=5 mm, 在 ANSYS WorkBench 2023 中建立质构仪球形探头和海参的装配体模型。5 个熟度等级和对照组的弹性模量如表 2 所示, 泊松比统一取 0.45, 海参和探头三维模型采用补丁适型法的四面体网格划分方式, 海参的网格密度为 0.8 mm, 探头的网格密度为 1 mm, 共生成 147681 个节点, 100655 个网格单元。探头和海参设置为有摩擦的接触关系, 摩擦系数为 0.3[36], 对海参底面施加固定约束。按海参整体压缩试验条件, 探头的最大下压距离为 5 mm, 加载时间为 30 s。

2.2.2　应力应变分布特征分析

以五成熟海参为例, 整体压缩仿真的等效应力与应变云图如图 8 所示。分析表明, 最大等效应力与最大变形均集中于探头与海参表面接触的中心区域。探头侧向挤压作用远小于垂直方向, 表明触压载荷主要转化为对海参表面的垂直径向作用力。同时, 等效应力与应变在海参体壁纵深方向呈现明显梯度变化, 说明压缩力主要由接触区浅层组织的变形承担, 体现了海参作为柔软生物组织的材料特性。

2.2.3　最大等效应力与熟度关系分析

提取不同熟度海参的最大等效应力, 结果如图 9 所示。对照组、三成熟、五成熟、七成熟、全熟及过熟组的最大等效应力分别为 0.2068、0.1263、0.0764、0.0573、0.0412、0.0274 MPa。随着熟化程度提高, 海参体壁所受最大等效应力呈单调下降趋势。与对照组相比, 五成熟组和过熟组的最大等效应力分别降低 63.06%和 86.75%, 表明煮制前期海参的“软化”速率高于后期。整体上, 最大等效应力的变化趋势与海参原料弹性模量的变化一致。

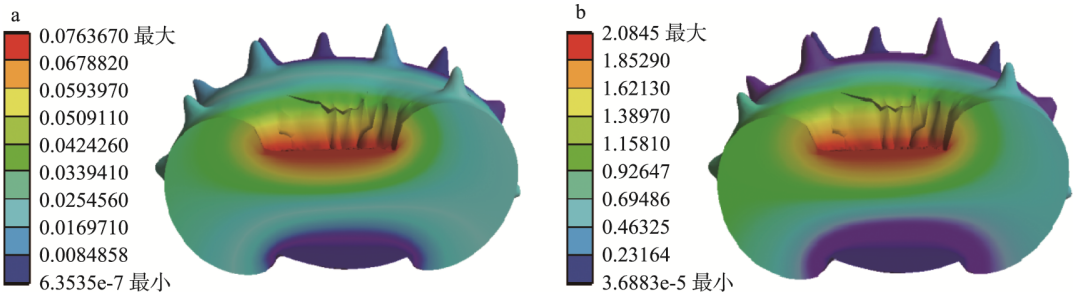


图 8　五成熟海参触压的应力云图(a)和应变云图(b)

Fig.8　Stress nephogram (a) and strain nephogram (b) of 50% cooked *Apostichopus japonicus* under contact pressure

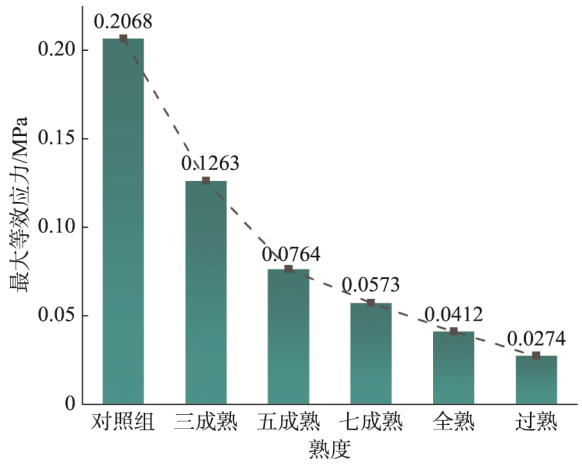
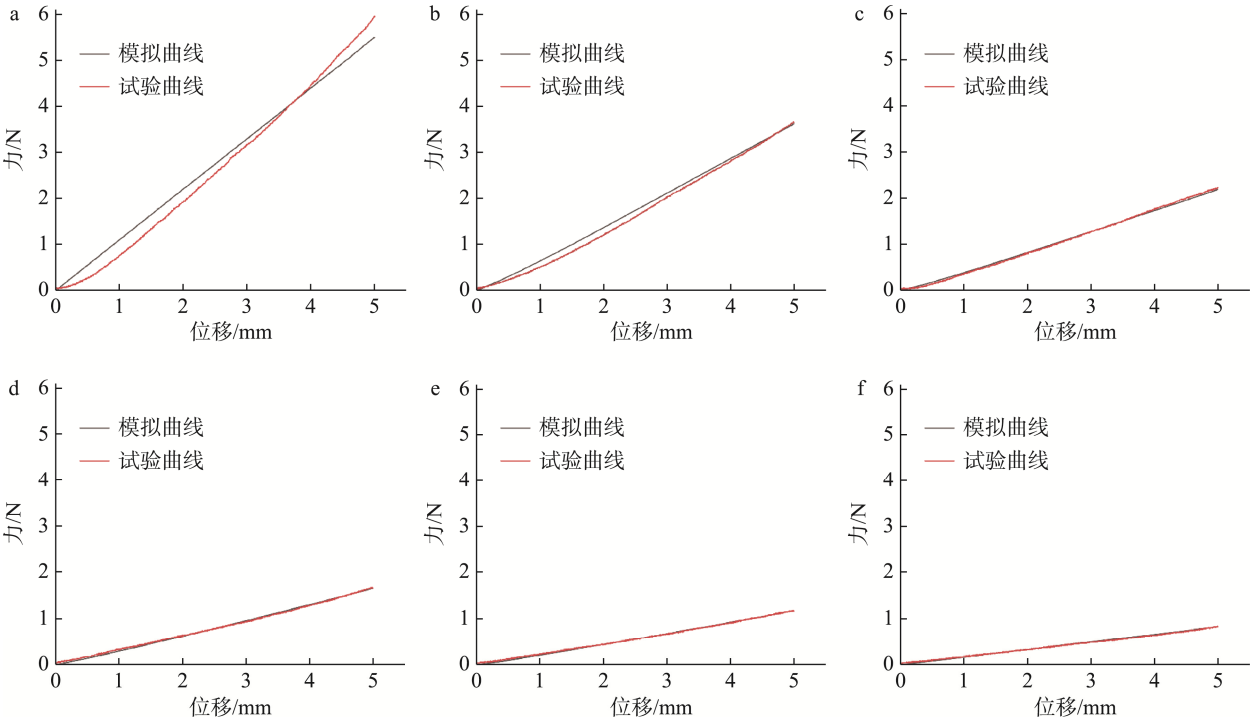


图 9 不同熟度海参触压的最大等效应力

Fig.9 Maximum equivalent stress of *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees under contact pressure

2.2.4 有效性验证

不同熟度海参的仿真与试验力-位移曲线对比如图 10 所示。各组最大相对误差分别为：对照组 5.89%、三成熟组 6.09%、五成熟组 0.96%、七成熟组 0.89%、全熟组 0.90%、过熟组 0.82%。其中，对照组与三成熟组的误差相对较大，主要原因在于仿真模型将海参简化为均质连续线弹性体，未考虑低熟度样本内部可能存在的微小空腔结构。实际触压过程中，海参体壁需先经历空腔压实阶段，随后才进入连续弹性变形，导致试验曲线呈现抛物线特征。随着熟度增加，海参组织进一步软化密实，内部空腔减少，其力学行为更接近线弹性假设，因此仿真与试验结果吻合度提高。尽管存在上述简化带来的误差，但仿真与试验曲线之间的差异远小于不同熟度样本间的力学响应差异(对比图 4 与图 10)，表明该模型能够有效模拟并反映不同熟度海参在触压过程中的力学响应趋势与规律，适用于变化趋势分析与相对规律验证。在后续实际检测设备开发中，可通过分段校准或多阶段力学模型进一步消除空腔带来的系统偏差，不影响整体检测方案的可行性与实用性。



注：a. 对照组；b. 三成熟；c. 五成熟；d. 七成熟；e. 全熟；f. 过熟。

图 10 不同熟度海参触压仿真-试验数据对比

Fig.10 Comparison of contact pressure simulation and contact pressure test data of *Apostichopus japonicus* with different cooking degrees

3 结 论

盐渍海参在煮制热处理中，海参体壁蛋白质变性与水分迁移共同导致其组织结构发生改变，进而影响其力学特性[37]。本研究通过力学试验与有限元模拟相结合，系统分析了煮制熟度对盐渍海参体壁力学特性的影响。结果表明，海参体壁弹性模量由对照组的$(1.024\pm0.110)\times10^5$ Pa 显著下降至全熟组的$(0.210\pm0.020)\times10^5$ Pa，过熟组进一步降至$(0.136\pm0.020)\times10^5$ Pa，降幅分别达 79.49%与 86.72%。弹性模量可作为表征海参煮制熟度的关键量化指标。整参压缩试验显示，熟度与最大压缩反力、刚度均呈极显著负相关($P<0.01$)，煮制初期(对照组至三成熟)的刚度与变形能

降幅尤为显著(分别达 75.12%和 44.08%), 主要因煮制初始阶段胶原蛋白快速变性、结构迅速松解, 力学性能发生骤变[29]。最大压缩反力与弹性模量高度相关(P<0.01), 表明通过整参压缩测试反推材料弹性状态具有可行性。有限元模拟表明, 触压载荷主要由接触区浅层组织承担, 最大等效应力随熟度升高而降低且与弹性模量变化趋势一致, 仿真与试验结果吻合良好(最大相对误差 6.09%), 但本研究将海参简化为均质连续线弹性体, 未考虑低熟度样本存在的微小空腔结构, 存在一定模型简化局限。本研究明确了盐渍海参煮制熟度与力学特性的定量关联, 证实了基于弹性模量、最大压缩反力等力学指标可实现海参煮制熟度快速、客观、无损检测, 可为海参加工工艺的智能化升级提供理论依据与数据支撑。

参考文献

[1] Hossain A, Dave D, Shahidi F. Antioxidant potential of sea cucumbers and their beneficial effects on human health [J]. Marine Drugs, 2022, 20(8): 521.

[2] 胡荣炊, 刘燕飞, 林丹, 等. 福建海参产业发展现状、问题与高质量发展路径研究[J]. 中国水产, 2025(12): 72–75.
Hu Rongchui, Liu Yanfei, Lin Dan, et al. Study on the present situation, problems and high-quality development path of Fujian Sea cucumber industry [J]. China Fisheries, 2025(12): 72–75.

[3] Huang Yizhen, Xie Yisha, Li Yanxin, et al. Quality assessment of variable collagen tissues of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) body wall under different heat treatment durations by label-Free proteomics analysis [J]. Food Research International, 2023, 165: 112540.

[4] 张悦容, 胡玲萍, 刘文, 等. 处理方法对仿刺参体壁蛋白纤维超微结构的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(5): 219–224.
Zhang Yuerong, Hu Lingping, Liu Wen, et al. Effects of processing method on ultrastructure of protein fiber in body wall of *Apostichopus japonicus* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(5): 219–224.

[5] Xiong Xin, Zhang Chen, Li Hongyan, et al. Dual role of calcium in regulating collagen integrity and proteolytic response during sea cucumber *Apostichopus japonicus* tenderization [J]. Food Research International, 2025, 221: 117389.

[6] Hyldig G. Sensory aspects of heat treated seafood [M]//Handbook of seafood and seafood products analysis. Boca Raton: CRC Press, 2024: 511–522.

[7] Li Shuang, Zhou Yan, Sun Liming, et al. Effects of storage method on the quality of processed sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*) [J]. Foods, 2022, 11(24): 4098.

[8] Zhang Min, Liu Yuxin, Zhao Guanhua, et al. Studying on effects of boiling on texture, microstructure and physiochemical properties of sea cucumber body wall and its mechanism using second harmonic generation (SHG) microscopy [J]. Food Chemistry, 2023, 400: 134055.

[9] Zulkifli N, Hashim N, Harith H H, et al. Finite element modelling for fruit stress analysis-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 29–37.

[10] Li Zhiguo, Li Pingping, Liu Jizhan. Physical and mechanical properties of tomato fruits as related to robot's harvesting [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(2): 170–178.

[11] Liu Xiaopeng, Cao Zhentao, Yang Liu, et al. Research on damage properties of apples based on static compression combined with the finite element method [J]. Foods, 2022, 11(13): 1851.

[12] 王芳. 西瓜压缩及蠕变特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008: 48–51.
Wang Fang. Study on compressive and creep characteristics of watermelon [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008: 48–51.

[13] 王京, 高连兴, 刘志侠, 等. 典型品种花生米静压力学特性及有限元分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 307–313.
Wang Jing, Gao Lianxing, Liu Zhixia, et al. Static mechanical property and finite element analysis of typical of peanut varieties [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(3): 307–313.

[14] 彭俊, 谢洪起, 冯亚利, 等. 冬枣压缩特性试验与计算仿真研究[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 20–25.
Peng Jun, Xie Hongqi, Feng Yali, et al. Experimental and simulation studies on mechanical properties of jujube (*Zizyphus jujuba* mill. cv. Dongzao) [J]. Food Science, 2017, 38(17): 20–25.

[15] 吴映桐, 吴子鸣, 张立军, 等. 皇冠梨静压力学特性及模拟研究[J]. 包装工程, 2023, 44(19): 50–57.
Wu Yingtong, Wu Ziming, Zhang Lijun, et al. Static pressure mechanical properties and simulation of Huangguan pears [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(19): 50–57.

[16] Feneuil B, Strøm Lillebø E, Honstad C L, et al. Elastic modulus measurements of cooked lutefisk [J]. Physics of Fluids, 2022, 34(4): 047122.

[17] Grasa J, Teresi L, van der Sman R. Large-strain anisotropic behavior of meat during cooking: a finite element study [J]. Current Research in Food Science, 2025, 11: 101230.

[18] 高坤, 张海红, 王娟, 等. 挤压对灵武长枣应力应变影响的有限元分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 207–213.
Gao Kun, Zhang Haihong, Wang Juan, et al. Finite element analysis of the influence of extrusion on the stress and strain of Lingwu long jujube [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(20): 207–213.

[19] Zheng Zhaoqi, Chen Jinghui, Tian Wei, et al. Finite element analysis of blueberry stack damage [J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(11): e13840.

[20] Kumar P, Roy A, Partridge B E. Engineering tough, energy-dissipating soft materials *via* sacrificial chemical bonds [J]. Nanoscale, 2025, 17(25): 15029–15067.

[21] 张梦月, 周勇, 张国忠, 等. 芋头压缩和剪切特性试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3): 206–212
Zhang Mengyue, Zhou Yong, Zhang Guozhong, et al. Mechanical properties of compression and shear of taro [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(3): 206–212

[22] Birenheide R, Tamori M, Motokawa T, et al. Peptides controlling stifness of connective tissue in sea cucumbers [J]. The Biological Bulletin, 1998, 194(3): 253–259.

[23] Motokawa T, Tsuchi A. Dynamic mechanical properties of body-wall dermis in various mechanical states and their implications for the behavior of sea cucumbers [J]. The Biological Bulletin, 2003, 205(3): 261–275.

[24] Salarikia A, Miraei Ashtiani S H, Golzarian M R, et al. Finite element analysis of the dynamic behavior of pear under impact loading [J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(1): 64–77.

[25] Oh M H, Kim T, Fredriksson D W, et al. Structural analysis of a subsurface cage for sea cucumber, *Stichopus japonicus*, grow-out using numerical modeling techniques [J]. Marine Technology Society Journal, 2012, 46(5): 55–66.

[26] Choi A P C, Zheng Y P. Estimation of Young's modulus and Poisson's ratio of soft tissue from indentation using two different-sized indentors: finite element analysis of the finite deformation effect [J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 2005, 43(2): 258–264.

[27] Zhongkui W, Hirai S. Finite element modeling and physical property estimation of rheological food objects [J]. Journal of Food Research, 2012, 1(1): 48.

[28] Holzapfel G A, Weizsäcker H W. Biomechanical behavior of the arterial wall and its numerical characterization [J]. Computers in Biology and Medicine, 1998, 28(4): 377–392.

[29] Liu Lianfeng, Zhang Zhaohui, Liu Qian, et al. Rheological and structural properties of sea cucumber *Stichopus japonicus* during different heating temperature [J]. International Journal of Fisheries and Aquaculture, 2012, 4(9): 209–216.

[30] Wang Jie, Lin Lin, Sun Xiao, et al. Mechanism of sea cucumbers (*Apostichopus japonicus*) body wall changes under different thermal treatment at micro-scale [J]. LWT, 2020, 130: 109461.

[31] Zhang Chengpeng, Li Laihao, Wang Qiuting, et al. Effect of thermal treatment and secondary bonds on the storage stability of ready-to-eat sea cucumbers [J]. Process Biochemistry, 2024, 147: 295–304.

[32] 冯雯鑫, 孙兵, 谢志平, 等. 枇杷压缩试验及有限元分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 227–233.
Feng Wenxin, Sun Bing, Xie Zhiping, et al. Compression test and finite element analysis of *Eriobotrya japonica*(Thunb.) Lindl [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 227–233.

[33] 刘波, 张本华. 圣女果常温贮藏过程中压缩特性试验[J]. 农机化研究, 2012, 34(9): 172–175.
Liu Bo, Zhang Benhua. Experimental study on cherry-tomato's compression properties during the process of storage [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(9): 172–175.

[34] Zhang Min, Liu Yuxin, Wu Zixuan, et al. Analysis of texture properties and water-soluble fraction proteome of sea cucumber body wall with different boiling heating treatment [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135333.

[35] Birenheide R, Tamori M, Motokawa T, et al. Peptides controlling stifness of connective tissue in sea cucumbers [J]. The Biological Bulletin, 1998, 194(3): 253–259.

[36] 陈康, 沈煜年. 软体机器人用多孔聚合物水凝胶的摩擦接触非线性行为[J]. 物理学报, 2021, 70(12): 156–166.
Chen Kang, Shen Yunian. Nonlinear frictional contact behavior of porous polymer hydrogels for soft robot [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(12): 156–166.

[37] Harini R, Natarajan V, Sunil C K. Sea cucumber significance: drying techniques and India's comprehensive status [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(7): 3995–4018.

(责任编辑: 曹岱琳 韩晓红)