

改进BP神经网络的海参原料品质检测

崔佳鹏, 张占葛, 侯宇佩, 杨松, 王慧慧*

大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月9日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

为解决海参原料分选缺乏客观科学评价标准的难题, 本文提出基于BP神经网络的品质检测分选方法, 可实现其品质快速检测与分选, 为后续加工营养保留提供支撑。研究首先通过单轴拉伸试验获取不同品质海参本构曲线, 明确品质边界以支撑后续变形有限元分析, 搭建有限元模型及本构-载荷-位移数据库, 建立BP神经网络本构识别模型。最后结合感官评价明确本构与品质的对应关系, 通过试验验证方法准确误差低于3%, 证明方法可行。本研究为海参原料科学化分选提供新路径, 对海参原料加工产业提质增效具有重要意义。

关键词

海参原料, 本构曲线, BP神经网络, 品质检测

Improvement of BP Neural Network for Sea Cucumber Raw Material Quality Detection

Jiapeng Cui, Zhange Zhang, Yupei Hou, Song Yang, Huihui Wang*

School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian Liaoning

Received: March 9, 2026; accepted: April 9, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

To address the problem of the lack of objective and scientific evaluation criteria for the selection of sea cucumber raw materials, this paper proposes a quality detection and sorting method based on BP neural network, which can achieve rapid quality detection and sorting of sea cucumbers, providing support for the subsequent processing of nutrient retention. The research first obtained the constitutive curves of different quality sea cucumbers through uniaxial tensile tests, clarified the quality boundaries to support the subsequent finite element analysis of deformation, established a

*通讯作者。

finite element model and constitutive-load-displacement database, and established a BP neural network constitutive identification model. Finally, by combining sensory evaluation, the corresponding relationship between the constitutive and quality was clarified, and the method was verified through experiments, with an accuracy error of less than 3% proving the feasibility of the method. This research provides a new path for the scientific sorting of sea cucumber raw materials and is of great significance for improving the quality and efficiency of the sea cucumber raw material processing industry.

Keywords

Sea Cucumber Raw Materials, Constitutive Curve, BP Neural Network, Quality Inspection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海参是名列世界八大珍品之一的珍贵海产品,有着非常高的药用和营养价值[1]-[4],是我国最重要的海珍品之一,年经济效益高达 1000 亿元[5]。但是海参的营养价值、口感等深受加工的影响,不同品质的海参原料采用相同的加工工艺,极易导致海参营养价值、熟化程度、口感等存在很大偏差[6],不同品质海参原料混杂加工而导致的营养流失不同,海参煮制 10 分钟,蛋白可减少 11.5%,多糖减少 33%,皂苷最多可减少 64.5% [7] [8]。因此在海参加工初始阶段对海参原料的品质进行筛选至关重要。

现有的海参原料分拣方式主要基于人工手捏、称重、量尺寸进行分级、还有的基于理化试验对整个批次的海参品质进行评估。现有的分拣方式能够实现海参原料的模糊分拣,但人工手捏分拣主观性较大,难以形成客观统一的标准,且客观检测技术缺乏,采用称重和尺寸测量的方法无法实现海参原料品质的分级,采用理化分析的方法无法实现海参原料品质的准确映射问题。综上所述,海参原料分拣最主要因为缺少对海参原料原理力学特性和边界的研究,以及缺少客观检测方法的研究。因此,对海参原料的力学特性和边界的测试以及海参原料本构和外部载荷的映射技术的研究对于海参原料的分级、深加工以及营养物质的保留至关重要。

针对海参原料以及生鲜品质检测的问题,国内外学者进行了大量的研究。邹小波[9]等人提出了一套基于近红外光谱技术(NIR)的海参品质检测和产地鉴别的综合解决方案,解决了海参产地快速鉴别和胶原蛋白含量无损快速检测的难题。王一帆[10]等人综合感官、质构、营养及功能性成分、体外可消化性,并采用主成分分析法建立了海参营养品质综合评价方法。傅志宇[11]等人以市售六种即食海参为研究对象,测定其水分、粗蛋白、灰分、总糖、胶原蛋白和皂苷含量以及脂肪酸和氨基酸组成,建立了基于味觉特征、微观结构、热稳定性和全质构特性的感官评价方法。Liu [12]等采用电感耦合等离子体质谱对海参元素进行定量分析,使用主成分分析、聚类分析和线性判别分析等识别技术,利用多元元素分析和模式识别技术按产地对海参进行分类。Sun [13]等利用衰减全反射荧光变换红外光谱(ATR-FTIR)结合深度学习的海参刺参地理快速识别方法。Huang [14]提出了一种基于 YOLOv9 和 RepViT 网络的高精度、高效率的海参实时识别和分选方法。Lin [15]等通过近红外光谱(NIR)和主成分分析(PCA)对来自四个地理区域的同一物种的干海参样品进行了分类。Zhao [16]等基于氨基酸(AA)碳稳定同位素指纹图谱实现了不同地理来源和不同生产方式海参的识别。Zhang [17]等基于全理论片段离子质谱(SWATH-MS)的蛋白质组学分析和化学计量学的连续窗口采集实现了不同地理来源的干海参产品的鉴别。薛长湖[18]等研究并总结了海

参在加工过程中的组分与食品结构变化规律。大连海洋大学宋志远[19][20]等研究并总结了不同加工方式和提取方法对海参营养品质的影响。大连工业大学周大勇团队[21]研究了煮制过程中海参体壁质构特性变化规律。杜俊洁[22]等基于质构仪分析了海参样品的硬度、弹性、咀嚼度，并形成了考虑多因素的海参品质感官评价方法。

综上所述，国内外专家学者基于营养成分、感官等多维度对海参的品质的判别进行了研究，能够准确识别海参的产地和海参的品质，但是相关的研究主要集中在加工后的海参的品质的判别、海参产地的判别，对于海参原料(未加工海参)的品质的判别研究较少。现有的对海参原料的分选主要还是基于人工按压来进行，缺乏科学的客观的评价方法，而原材料的分选对于海参后续的加工至关重要，因此对于海参原料品质的检测方法和设备的研究至关重要。

2. 研究思路

针对海参原料分选缺乏客观科学评价方法的问题，本文提出一种基于 BP 神经网络的海参原料品质检测分选方法，能够实现海参原料品质的快速检测和分选，为海参后续加工过程中营养物质的保留奠定了基础。

基于 BP 神经网络的海参原料品质检测如图 1 所示。

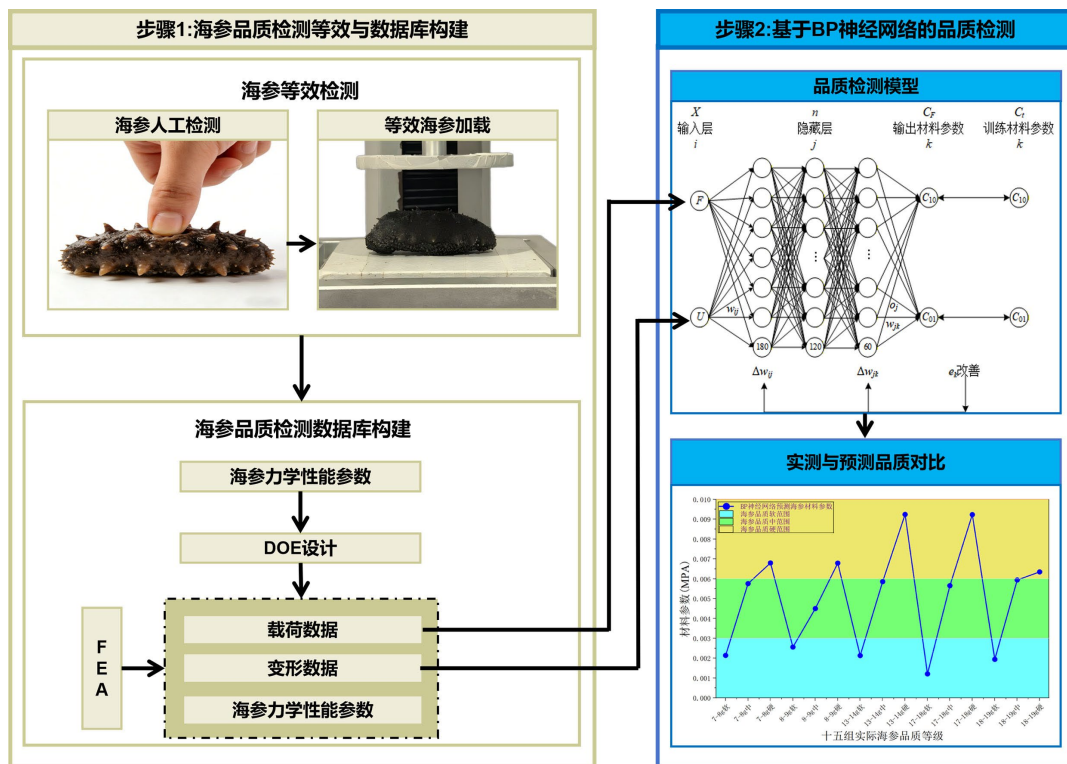


Figure 1. Sea cucumber quality inspection and verification system
图 1. 海参品质检测及验证体系

首先，针对海参原料本构和边界模糊的问题，开展海参原料力学性能测试，基于单轴拉伸试验获取不同品质海参原料的本构曲线，并通过不同品质海参原料的力学性能曲线，确定海参原料品质的边界，针对海参原料分选缺乏客观评价方法的问题，提出基于有限元和串联 BP 神经网络的海参原料品质可视检测方法。基于人工分拣方式，构建海参原料等效分拣方法；建立海参原料分拣的有限元分析模型，通

过有限元仿真获得不同品质海参原料在载荷作用下的力 - 位移响应, 构建海参原料本构 - 载荷 - 位移数据库; 基于 BP 神经网络, 以载荷和位移为输入, 海参原料本构为输出, 构建海参原料本构识别模型。

最后, 基于海参原料本构和品质感官确定海参原料与品质的对应关系和边界。搭建海参原材料品质判别试验台, 开展不同载荷、不同品质海参原料的判别试验验证, 验证方法的准确性。

3. 基于 BP 神经网络的海参品质检测

3.1. 基于感官的海参原料品质客观检测方法和有限元仿真分析

海参原材料样品来自大连同仁堂, 由企业经验丰富的评价员工从同一批次约数千根海参中先按克重进行初步分组, 再依据手捏海参的回弹大小, 将每一克重组别中的海参分为软、中、硬三类。按照分层抽样原则, 从每一克重组别中分别随机选取软、中、硬各两根样品, 覆盖 7~9 g、9~10 g、13~14 g、17~18 g、18~19 g 五个重量区间, 尺寸范围在 60 mm 到 75 mm 之间, 合计 30 根海参原材料用于力学性能试验。

根据单轴拉伸试验得知人工感官判别为软的海参的 C_{10} 的值范围为 0.00134~0.00334 Mpa, 中的海参的 C_{10} 的值范围为 0.00413~0.00542 Mpa, 软的海参的 C_{10} 的值范围为 0.00634~0.01215 Mpa。人工感官判别为软的海参的 C_{01} 的值范围为 0.00131~0.00256 Mpa, 中的海参的 C_{01} 的值范围为 0.00343~0.00642 Mpa, 软的海参的 C_{01} 的值范围为 0.00682~0.00934 Mpa。同时, 随着海参重量的增加, C_{10} 和 C_{01} 两个参数均未随着重量的变化而变化, 而是呈现出无序的变化现象, 这说明海参原料的大小对于海参原料品质判断的影响较小。

考虑到海参样本的数量和随机性, 基于海参力学拉伸试验结果, 确定了海参原料力学性能参数 C_{10} 和 C_{01} 的边界, 其中 C_{10} 的值范围为 0.00134~0.01215 Mpa, 其中 C_{01} 的值范围为 0.00131~0.00934 Mpa。

3.1.1. 基于感官的海参原料品质客观检测方法

人工对海参品质的判别主要是通过手捏的感官触觉来判断, 其本质为海参原料的品质、变形程度和手指感受到的反作用力的映射, 但人工判别存在很强的主观性。为实现海参原料品质的客观评定, 本文设计了一种客观的海参原料品质的检测方法, 将人工按压等效为机器按压的方式, 通过海参原料的变形和反作用力, 实现海参原料品质的判断, 等效方法如图 2 所示。

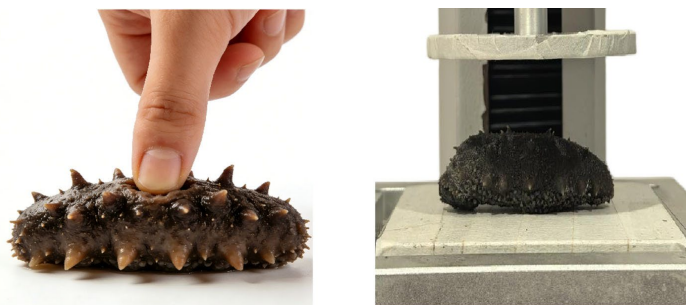


Figure 2. Sea cucumber equivalent method sea cucumber equivalent method
图 2. 海参等效方法

3.1.2. 海参原料按压有限元分析模型

海参为圆筒状, 背面有疣足, 腹面有管足, 体壁柔韧, 富于结缔组织, 厚薄随种类而异, 偏软, 纵剖面为椭圆形。自然状态下海参原料为近半椭圆型, 疣足软且整体没入体壁中, 因此表面可以等效为光滑表面。基于参数化建模方法, 构建了海参的参数化三维模型。

基于提出的海参原料品质检测方法, 构建了海参压缩有限元分析模型。其中, 上下压板为六面体网

格且为刚性, 海参采用四面体网格, 材料模型选择 Mooney-Rivlin 模型, 材料参数 C_{10} 与 C_{01} 为实测海参原料的参数。接触区域的局部细化网格为 0.001 mm, 海参和上下压板的摩擦系数取 0.15, 下板固定, 上板在垂直方向施加稳态力。对海参进行有限元分析。如图 3 所示。

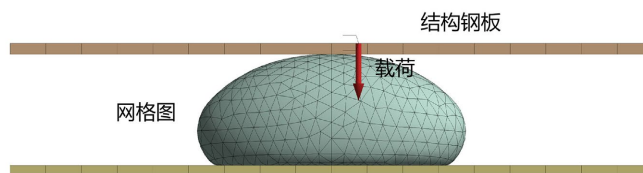


Figure 3. Finite element model of sea cucumber loading
图 3. 海参加载有限元模型

3.1.3. 海参有限元分析验证

根据提出的海参原料检测方法, 搭建了试验台如下图所示, 试验台由质构仪(TMS-PRO 型, 美国 FTC 公司)、上压板、下压板组成, 质构仪记录海参原料压缩过程中的载荷和位移。从海参样本中取出一根海参样品, 分别施加 2 N, 3 N, 4 N, 5 N, 6 N 的载荷, 得到海参原料的变形。

基于建立的有限元分析方法, 建立实测海参的三维模型, 长度为 60 mm, 宽度为, 高度为 15 mm, 宽度为 20 mm。材料参数 C_{10} 与 C_{01} 分别为 0.0014 Mpa 和 0.0021 Mpa (相关参数为海参原料压缩试验后从同一个样品中取样获得), 分别进行了载荷为 2 N, 3 N, 4 N, 5 N, 6 N 的有限元分析, 其中, 接触前子步数设为 20, 初始子步数为 80, 最大与最小子步数分别为 80 和 40。同一个海参的实测和仿真的变形结果变形如下表 1 所示。

Table 1. Experimental data and simulation comparison results

表 1. 实测海参变形和有限元仿真变形对比

施加载荷\N	实验位移\mm	仿真位移\mm	位移误差\%
2	4.11	3.8258	6.6
3	4.94	4.6609	5.6
4	5.49	5.3375	2.8
5	5.94	5.9021	0.64
6	6.52	6.3705	2.3

从表 1 可知, 同一根海参在不同载荷作用下的有限元仿真分析的变形与实际变形的误差小于 6.6%, 说明海参有限元仿真的准确性。

3.2. 基于有限元分析和 BP 神经网络的海参品质可视检测方法

3.2.1. 基于有限元分析的海参品质数据库

海参材料参数 C_{10} 与 C_{01} 在 0.001~0.01 MPa 范围内, 载荷在 0~10 N 范围内, 基于 DOE 全因子法, 生成 1000 组材料参数和载荷组合。基于验证的有限元分析模型, 对不同品质的海参在不同载荷作用下的变形进行了有限元分析, 提取 1000 组海参材料和载荷组合作用下的各个节点的变形, 建立包含载荷、海参三维坐标、节点的位移、海参品质参数 C_{10} 和 C_{01} 的数据库。

3.2.2. 基于 BP 神经网络的海参品质检测方法

以外部载荷和海参最大变形为输入, 以材料参数 C_{10} 和 C_{01} 为输出, 基于海参品质数据库, 建立了基

于 BP 神经网络的海参品质检测模型如图 4 所示。

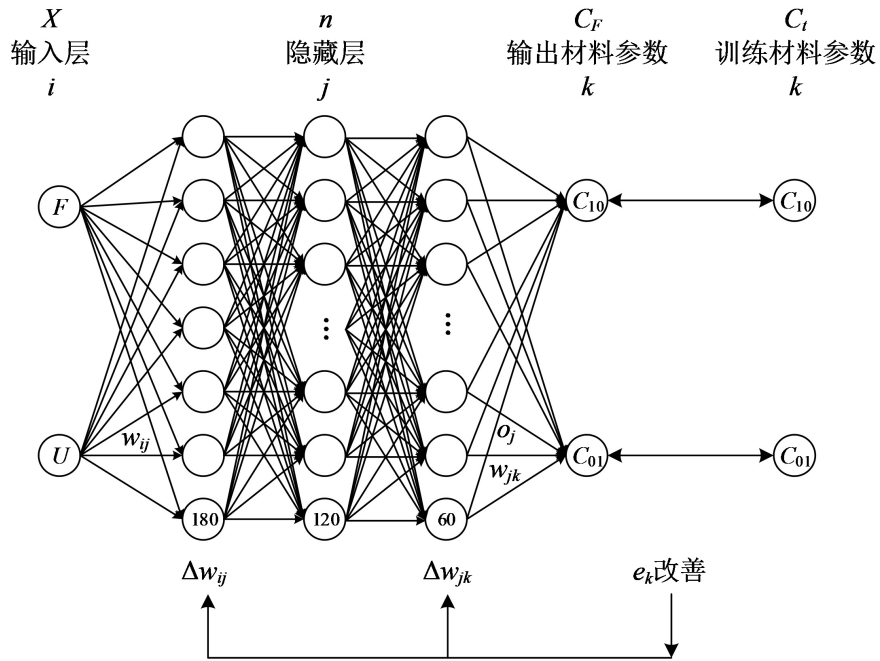


Figure 4. A sea cucumber quality prediction model based on BP neural network
图 4. 基于 BP 神经网络的海参品质预测模型

为提升模型训练的效率和稳定性，数据采用 StandardScaler 进行了归一化处理，使得输入数据的均值为 0，标准差为 1，如下式(1)所示。同时，使用多层感知器(MLP)回归模型处理预测任务。

$$X_{scaled} = \frac{X - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

其中， X 为输入数据， μ 是特征的均值， σ 是特征的标准差。标准化后，输入数据的每一维度都具有相同的尺度。

为了提升模型的泛化能力，采用 augment_data 函数添加噪声对训练样本进行增强，如下式(2)所示：

$$X_{augmented} = X + \mathcal{N}(0, noiselevel) \tag{2}$$

其中， $\mathcal{N}(0, noiselevel)$ 表示添加的噪声，噪声的标准差由 noise_level 控制。通过这一过程，生成了多个不同版本的输入数据，增强了模型对多样性数据的学习能力。

网络的输入层包含 2 个节点，分别对应载荷 F 和位移 U 。输出层为材料参数 C_{10} 与 C_{01} 。隐含层的为 3 层，节点数量分别为 180、120 和 60 个。隐藏层节点的输入信号 n_j 由输入层到该层节点的加权和与偏置项 a_i 组成，如下式(3)所示。

$$n_j = \sum_{i=1}^4 w_{ij} x_i + a_i \tag{3}$$

式中， w_{ij} 是输入层到隐藏层的连接权重， x_i 是输入信号， a_i 是该层的偏置项。

隐含层的输出 o_j 通过激活函数 $f(n_j)$ 进行处理，本文采用 ReLU 激活函数，如下式(4)所示：

$$o_j = f(n_j) = \max(0, n_j) \tag{4}$$

输出层的计算公式如下式(5)所示:

$$\epsilon_k = g \left(\sum_{j=1}^8 w_{jk} o_j + b_k \right) \quad (5)$$

式中, w_{jk} 是隐藏层到输出层的连接权重, o_j 是隐藏层的输出, b_k 是输出层的偏置项, g 是输出层的激活函数。

网络的误差计算使用均方误差(MSE)作为损失函数, 如下式(6)所示:

$$e_k = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 (\epsilon_{Fk} - \epsilon_{tk})^2 \quad (6)$$

式中, C_{Fk} 为预测的输出值, C_{tk} 为目标真实值, s 为样本数。

采用梯度下降法对权重进行更新。权重更新如下式(7)所示:

$$w_{ij}^{m+1} = w_{ij}^m + \eta \frac{\partial e}{\partial w_{ij}}, \quad w_{jk}^{m+1} = w_{jk}^m + \eta \frac{\partial e}{\partial w_{jk}} \quad (7)$$

式中, η 是学习率, $\frac{\partial e}{\partial w_{ij}}$ 和 $\frac{\partial e}{\partial w_{jk}}$ 分别是误差对于输入层到隐藏层权重和隐藏层到输出层权重的梯度。

4. 实验验证

基于搭建的海参压缩实验设备如图 5 所示, 通过实时采集变形和载荷数据, 输入建立的串联 BP 神经网络的海参品质测量和变形重构模型中, 通过实测和有限元仿真分析的对比, 验证方法的有效性和准确性。

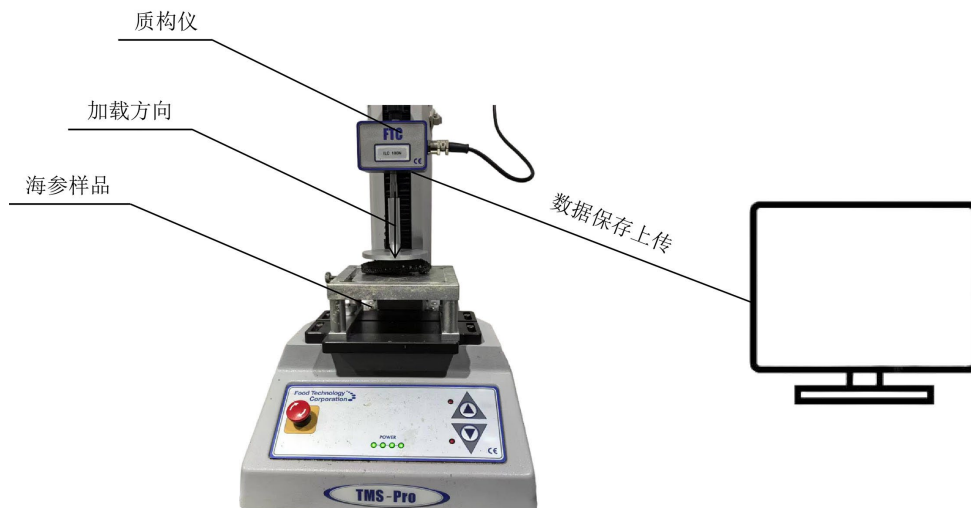
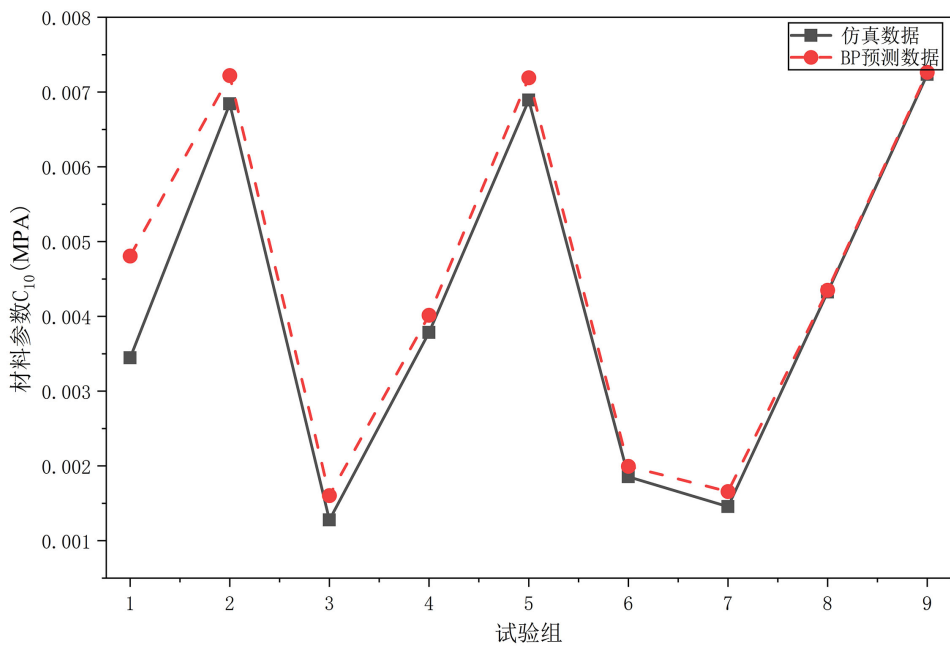


Figure 5. Sea cucumber loading test system
图 5. 海参加载试验系统

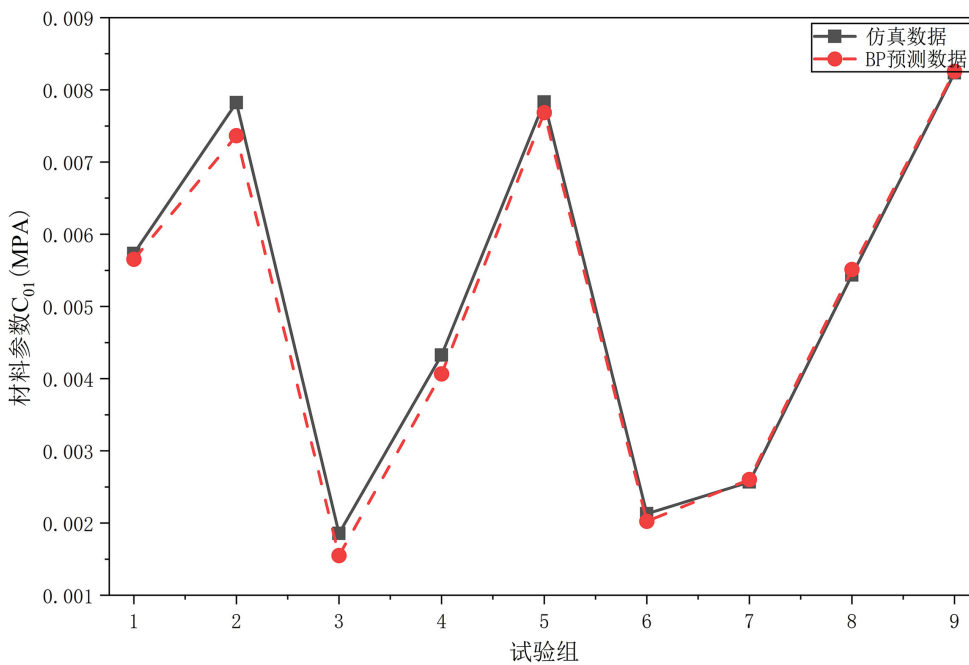
4.1. 基于仿真的海参品质预测模型的验证

为验证神经网络模型对材料参数 C_{10} 与 C_{01} 预测的有效性和准确性, 以试验组 0~3、3~6、6~10 为划分界限, 每个区间内分别设置软、中、硬 3 类材料参数组合, 形成覆盖不同品质海参的完整验证样本集。将 9 组有限元仿真实验的输出结果作为输入, 代入训练完成的神经网络模型中, 得到预测材料参数 C_{10} 与

C_{01} 。预测 C_{10} 与 C_{01} 与有限元仿真实验中预设材料参数 C_{10} 与 C_{01} 进行对比, 如图 6 所示。



(a) C_{10} 对比



(b) C_{01} 对比

Figure 6. Comparison of training material parameters and simulation parameters for neural networks
图 6. 预测与仿真材料参数对比

通过对比可知, 本文提出方法预测的与有限元仿真海参材料参数 C_{10} 与 C_{01} 值的平均误差为 3%, 最大奇异点误差为 8%。

4.2. 基于实测的海参品质预测模型的验证

4.2.1. 实测力与位移

设计了 15 组下压海参实验，质构仪初始高度为 25 mm，触碰海参后位移速度为 10 mm/min，下压变形量为 30%，力感应量程为 100 N，起始力设置为 0.02 N，海参下压过程中力和位移的变化如图 7 所示。

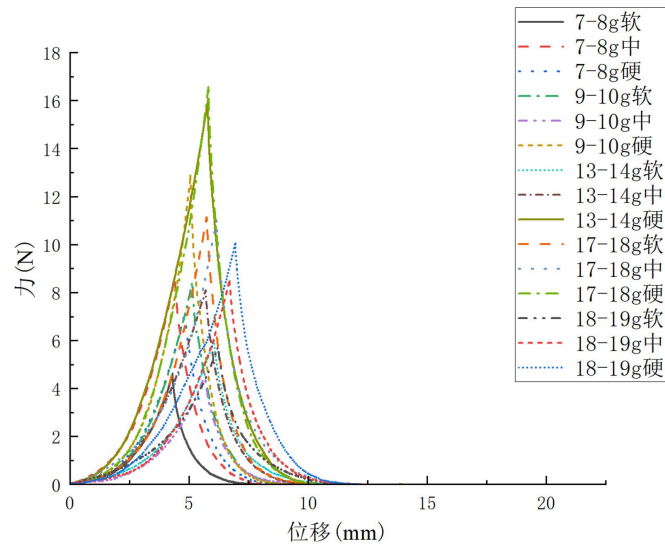


Figure 7. Measured sea cucumber force - displacement data
图 7. 实测海参力 - 位移数据

4.2.2. 基于实测力与位移的模型验证

以峰值处的力与位移作为特征值，带入训练的海参品质预测模型中，得到海参材料参数 C_{10} 与 C_{01} ，与实际测量时海参的品质等级区间进行对比验证如图 8 所示。

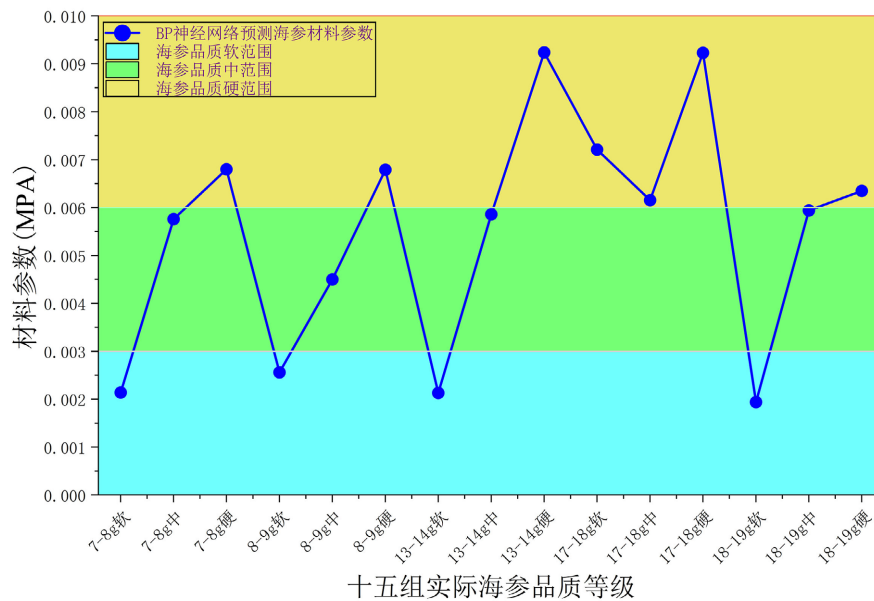


Figure 8. Comparison of sea cucumber quality grades
图 8. 海参品质等级对比

由上图可知, 实际根据模型计算的海参材料品质等级与实际测量的海参品质等级最大误差在 3% 以内。主要原因包含两个方面, 一是神经网络的训练数据基于有限元分析, 有限元分析本身存在误差。二是海参实验过程中因为海参疣足部分突出, 导致压板接触到疣足时开始计算变形量, 使得实测海参位移变大。

5. 结论

(1) 本文通过单轴拉伸试验获得了海参原料的力学性能参数, 并基于 Mooney-Rivlin 模型实现了材料参数表征。结果表明, 不同品质海参在 C_{10} 和 C_{01} 和 C_{10} 和 C_{01} 参数上具有一定差异, 可为海参原料品质划分提供力学依据。

(2) 基于有限元分析构建了海参原料“载荷-位移-本构参数”数据库, 并建立了 BP 神经网络品质预测模型。验证结果表明, 该方法能够较好实现海参原料品质识别, 实测等级判别误差控制在 3% 以内, 说明该方法具有一定可行性。

(3) 本研究仍存在一定局限性, 如样本数量较少, 品质分级仍受人工感官影响, 且模型对海参尺寸、形状差异及黏弹性特征考虑不足。其中, 尺寸和形状差异可能影响海参受压时的接触状态和变形响应, 黏弹性特征未纳入模型时, 可能难以充分反映其实际力学行为, 从而对预测精度产生一定影响。后续需进一步扩大样本规模, 优化模型与本构描述, 提高检测结果的准确性和稳定性。

参考文献

- [1] Li, D., Li, L., Xu, T., Wang, T., Ren, J., Liu, X., *et al.* (2018) Effect of Low Molecular Weight Oligopeptides Isolated from Sea Cucumber on Diabetic Wound Healing in db/db Mice. *Marine Drugs*, **16**, Article 16. <https://doi.org/10.3390/md16010016>
- [2] Zheng, Z., Li, M., Jiang, P., Sun, N. and Lin, S. (2022) Peptides Derived from Sea Cucumber Accelerate Cells Proliferation and Migration for Wound Healing by Promoting Energy Metabolism and Upregulating the ERK/AKT Pathway. *European Journal of Pharmacology*, **921**, Article 174885. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2022.174885>
- [3] 李亚茹, 李东萍, 罗永康. 海参——海洋中的健康守护者[J]. 中国水产, 2025(2): 41-42.
- [4] 李龙, 傅志宇, 刘煜珺, 等. 即食海参体壁蛋白模拟消化产物的抗氧化活性及作用机制[J]. 食品工业科技, 2026, 1-21.
- [5] 李文强. 浅析大连海参产业发展现状及建议[C]//山西省农业科学院现代农业研究中心. 2025(第四届)农业高标准高质量发展研讨会论文集. 太原: 山西科学技术出版社, 2025: 114-119.
- [6] 于鹏能, 米锐, 鞠念衡, 等. 加工方式对刺参体壁渗出液中多糖理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 1-14.
- [7] Yin, P., Jia, A., Heimann, K., Zhang, M., Liu, X., Zhang, W., *et al.* (2020) Hot Water Pretreatment-Induced Significant Metabolite Changes in the Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*. *Food Chemistry*, **314**, Article 126211. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126211>
- [8] 时佳凝, 李萌. 海参热加工过程中营养成分变化的研究进展[J]. 农产品加工, 2024(5): 101-106.
- [9] 邹小波, 薛瑾, 石吉勇, 等. 基于近红外光谱技术的海参品质快速检测[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(9): 3431-3437.
- [10] 王一帆, 赵影, 时佳凝, 等. 4 种市售即食海参质构特性及营养品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 263-272.
- [11] 傅志宇, 李龙, 于笛, 等. 不同市售即食海参营养品质差异分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 38-47.
- [12] Liu, X., Xue, C., Wang, Y., Li, Z., Xue, Y. and Xu, J. (2012) The Classification of Sea Cucumber (*Apostichopus japonicus*) According to Region of Origin Using Multi-Element Analysis and Pattern Recognition Techniques. *Food Control*, **23**, 522-527. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.08.025>
- [13] Sun, Y., Liu, N., Zhao, L., Liu, Q., Wang, S., Sun, G., *et al.* (2024) Attenuated Total Reflectance-Flourier Transformed Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) Coupled with Deep Learning: A Rapid Method for Geographical Origin Identification of Sea Cucumber *Apostichopus japonicus*. *Microchemical Journal*, **204**, Article 111037.

-
- <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111037>
- [14] Huang, M. and Wei, H. (2025) An Efficient Method for Sea Cucumber Recognition and Sorting Based on Improved YOLOv9 and RepViT. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, **108**, 622-629. <https://doi.org/10.1587/transfun.2024eap1101>
- [15] Tao, L., Wu, Z.C., Zhang, P.Y., *et al.* (2011) Rapid Identification of Dried Sea Cucumber Products from Different Geographical Areas by Near-Infrared Spectroscopy. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **27**, 364-366.
- [16] Zhao, X., Liu, Y., Li, Y., Zhang, X. and Qi, H. (2018) Authentication of the Sea Cucumber (*Apostichopus japonicus*) Using Amino Acids Carbon Stable Isotope Fingerprinting. *Food Control*, **91**, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.03.041>
- [17] Zhang, H., Zhang, X., Zhao, X., Xu, J., Lin, C., Jing, P., *et al.* (2019) Discrimination of Dried Sea Cucumber (*Apostichopus japonicus*) Products from Different Geographical Origins by Sequential Windowed Acquisition of All Theoretical Fragment Ion Mass Spectra (SWATH-MS)-Based Proteomic Analysis and Chemometrics. *Food Chemistry*, **274**, 592-602. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.082>
- [18] 常耀光, 刘艳艳, 石菲菲, 等 海参在加工过程中的组分与食品结构变化[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1129-1142.
- [19] 赖帅众, 宋志远, 李双双, 等 不同加工方式和提取方法对海参多糖的影响研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(5): 205-212.
- [20] 王义轩, 于笛, 傅志宇, 等 不同热处理方式对工厂化养殖海参营养品质变化影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(3): 106-114.
- [21] 张敏. 煮制对海参质构及消化特性的影响规律及机制研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连工业大学, 2023.
- [22] 杜俊洁, 刘诗洋, 步营, 等. 海参定量卤制工艺优化及品质评价[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(6): 42-48.