

基于温度分布和水分状态分布的扇贝柱蛋白质加热变性数值模拟

石启龙, 刘 静, 赵 亚

Numerical Simulation of Protein Denaturation of Scallop Adductors during Heating Based on Temperature Distribution and Water Status Distribution

SHI Qilong, LIU Jing, and ZHAO Ya

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030367>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

亲水胶体成膜预处理对扇贝柱热泵干燥动力学与品质的影响

Effects of Hydrocolloids Coating Pretreatment on the Drying Kinetics and Quality Attributes of Heat Pump Dried Scallop Adductors

食品工业科技. 2021, 42(12): 55-60 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100112>

基于低场核磁共振的预包装即食牛肉保质期预测模型研究

Research on Shelf Life Predicting Model of Prepackaged Instant Beef Based on Low-field Nuclear Magnetic Resonance

食品工业科技. 2024, 45(8): 301-308 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060175>

基于低场核磁共振横向弛豫谱的注水肉检测模型建立

Establishment of Detection Model of Water-injected Meat Based on Low Field Nuclear Magnetic Resonance Transverse Relaxation Spectroscopy

食品工业科技. 2021, 42(11): 226-232 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070304>

基于熵权法、灰色关联度法和低场核磁共振检测的苹果品质评价

Apple Quality Evaluation Based on Entropy Weight Method, Grey Relational Degree Method and Low-field Nuclear Magnetic Resonance Detection

食品工业科技. 2024, 45(1): 231-238 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010032>

脱水过程中蚕豆种子内部水分相态变化及表面水分损失动力学研究

Internal Water Phase Changes and Surface Moisture Loss Kinetics of Broad Bean Seeds during Dehydration

食品工业科技. 2020, 41(17): 51-57 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.009>

胡萝卜片微波真空干燥动力学数值拟合

Numerical Simulation of Microwave Vacuum Drying Kinetics of Carrot Chips

食品工业科技. 2020, 41(18): 17-23 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.18.003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

石启龙, 刘静, 赵亚. 基于温度分布和水分状态分布的扇贝柱蛋白质加热变性数值模拟 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 239–247.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030367

SHI Qilong, LIU Jing, ZHAO Ya. Numerical Simulation of Protein Denaturation of Scallop Adductors during Heating Based on Temperature Distribution and Water Status Distribution[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 239–247. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030367

· 分析检测 ·

基于温度分布和水分状态分布的扇贝柱蛋白质加热变性数值模拟

石启龙, 刘 静, 赵 亚*

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东淄博 255000)

摘 要: 蛋白质变性是影响扇贝柱热加工（干燥、真空低温慢煮、高温烹饪等）制品品质的关键点，构建扇贝柱蛋白质变性动力学模型，揭示蛋白质变性及其与水分状态的相关性，对于调控扇贝柱热加工制品品质至关重要。本文采用差示扫描量热仪（differential scanning calorimeter, DSC）获得扇贝柱蛋白质变性动力学参数；基于温度分布与水分状态分布，对扇贝柱蛋白质加热变性进行数值模拟。利用低场核磁共振（low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR）技术探究扇贝柱水分组成及状态分布规律。结果表明，扇贝柱肌球蛋白初始变性温度 32.50 °C，完全变性温度 55.00 °C；肌动蛋白初始变性温度 51.25 °C，完全变性温度 77.50 °C。超声波（ultrasonic, US）预处理导致肌球蛋白和肌动蛋白变性温度都提高了 3.75 °C，进而提高了扇贝柱热稳定性。随着蛋白质变性程度增加，强结合水（ T_{2b} ）和弱结合水（ T_{21} ）弛豫时间在小范围内波动（ T_{2b} 0.19~0.25 ms, T_{21} 1.38~2.97 ms），不易流动水（ T_{22} ）和自由水（ T_{23} ）弛豫时间减少； T_{22} 所占比例显著降低， T_{2b} 和 T_{21} 比例略有增加，而 T_{23} 比例基本保持恒定状态。相比于对照组，US 预处理导致 T_{22} 弛豫时间及其所占比例降低。肌球蛋白和肌动蛋白变性程度与自由水、不易流动水及其所占比例呈负相关。因此，通过监测扇贝柱水分组成及状态分布，可无损、快速评估扇贝柱肌球蛋白和肌动蛋白加热变性程度。

关键词: 扇贝柱, 超声波, 蛋白质变性, 动力学模型, 数值模拟, 低场核磁共振

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)05-0239-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030367



本文网刊:

Numerical Simulation of Protein Denaturation of Scallop Adductors during Heating Based on Temperature Distribution and Water Status Distribution

SHI Qilong, LIU Jing, ZHAO Ya*

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Protein denaturation is the key point affecting quality attributes of the scallop adductors (SA) during thermal processing such as drying, sous-vide cooking and traditional cooking. It is of crucial importance to establish a kinetics model of protein denaturation and reveal its relationship with water status of SA for regulating the quality of SA with thermal processing. Protein denaturation kinetics parameters were obtained by using differential scanning calorimeter (DSC). Protein denaturation during heating was numerically simulated based on the temperature distribution and water status distribution. The water status and distribution was measured by using low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). The result indicated that the initial and complete denaturation temperatures of myosin were 32.50 °C and 55.00 °C, respectively. While the counterparts of actin were 51.25 °C and 77.50 °C, respectively. Ultrasonic (US) pre-treatment

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2020MC215); 江苏省重点研发计划 (现代农业) 项目 (BE2023341)。

作者简介: 石启龙 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬/水产品加工与贮藏, E-mail: qilongshi@sdut.edu.cn。

* 通信作者: 赵亚 (1974-), 女, 硕士, 高级实验师, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: zy0028014@sdut.edu.cn。

improved thermal stability of protein because the denaturation temperature of myosin and actin was increased by 3.75 °C compared to the control group. The relaxation time of the tightly bound water (T_{2b}) and loosely bound water (T_{21}) fluctuated with a narrow range (T_{2b} 0.19~0.25 ms, T_{21} 1.38~2.97 ms), and the immobilized water (T_{22}) and free water (T_{23}) decreased with the increase of protein denaturation degree. While the proportion of T_{22} decreased significantly, and that of T_{2b} and T_{21} increased slightly, but the proportion of T_{23} remained a dynamic stable state. Compared to the control group, US pretreatment resulted in a decrease in the T_{22} and its proportion. The denaturation of myosin and actin was negatively correlated with the free water, immobilized water and its proportion. Therefore, the denaturation degree of myosin and actin during heating can be non-destructively and quickly evaluated by monitoring the water status and distribution of SA.

Key words: scallop adductors; ultrasonic; protein denaturation; kinetic model; numerical simulation; low-field nuclear magnetic resonance

扇贝(*Argopecten irradians*)营养价值丰富,是全球海洋生态系统中重要的商业渔业资源^[1]。扇贝含水率高、内源酶种类丰富而且活性高,极易腐烂变质,货架期较短^[2]。干燥是通过热力或非热力方法去除水分,降低水分活度,延长水产品货架期的有效方法^[3]。热风干燥时间短但能耗高,而且水产品容易发生表面硬化,肌原纤维蛋白严重变性和断裂,干制品质构和复水性能差^[4]。热泵干燥具有参数易于控制、节能和环境友好等优点,是取代热风干燥(干燥效率高但品质差)和冷冻干燥(品质高但能效低)的可供选择的方法^[5]。但是,干燥时间长、干燥后期效率低是限制热泵干燥在水产品干燥中应用的瓶颈^[6]。干燥前预处理可显著强化水产品干燥特性、改善干制品品质。超声波(*ultrasonic*, US)、可食性成膜、脉冲电场、低温等离子体、欧姆加热、超高压等非热力预处理技术在水产品干燥中应用前景广阔^[7]。Zhu 等^[8]研究表明,US 预处理能够提高扇贝柱热泵干燥效率,改善干制品品质,但机制尚未明确。

新鲜扇贝柱组织结构紧密有序,肌纤维均匀、整齐排列,但在热处理过程中,肌原纤维蛋白断裂,局部交联、聚集,结构破坏,持水能力下降^[6,9]。US 处理通过对蛋白质结构改性进而强化其功能特性^[10]。例如,US 处理导致凡纳滨对虾肌原纤维蛋白分子伸展,强化其流变学特性和凝胶强度^[11]。US 处理导致猪肉肌球蛋白和肌动蛋白变性,蛋白质二级和三级结构改性,显著提高其表面疏水性^[12]。US 处理(200 W)增加了金线鲷肌原纤维蛋白的溶解性^[13]。相比于静态腌制,US 辅助腌制处理有助于猪肉肌原纤维蛋白链的展开,促进疏水基团暴露^[14]。然而,US 对扇贝柱蛋白质加热变性影响规律尚未明确,这影响了 US 对水产品尤其扇贝柱干燥效率和品质特性机理的探究。

研究扇贝柱蛋白质加热变性动力学,建立蛋白质变性动力学模型,有助于评估任意温度和/或时刻蛋白质变性程度,揭示 US 预处理对蛋白质变性程度的影响规律。此外,通过蛋白质变性动力学模型,有利于确定合理的加工条件,探究热处理所导致的理化特性(色泽、体积收缩、质构特性等)变化,对有效提高加工产品品质具有重要意义^[15]。差示扫描量热仪(*differential scanning calorimeter*, DSC)可用于测定

肉制品的蛋白质变性动力学参数,例如:日本对虾^[16]、小龙虾^[17]和牛肉^[18]。Fan 等^[17]利用 DSC 对微波和沸水加热小龙虾尾的蛋白质变性和过热程度进行了可视化评价。然而,水产品加热过程中的传热和传质,都未能描述在宏观水产品组织中发生的蛋白质变性分布的非稳态变化。此外,通过温度诱导的蛋白质变性和结构收缩,扇贝柱水分状态同时变化。由此可见,水产品加热过程中,水分组成及状态分布与蛋白质加热变性存在内在联系。然而,扇贝柱蛋白质加热变性程度与其水分组成及状态分布的内在联系尚未见报道。因此,研究扇贝柱加热变性动力学对于探究 US 改善扇贝柱热加工性能机制,选择合适的热处理条件以提高扇贝柱热加工(干燥、真空低温慢煮、高温烹饪等)制品品质具有重要的意义。基于此,本文采用 DSC 获得扇贝柱加热变性动力学,利用低场核磁共振(*low-field nuclear magnetic resonance*, LF-NMR)技术揭示扇贝柱加热过程中水分组成及状态分布规律,比较 US 预处理对扇贝柱蛋白质加热变性动力学参数的影响,探究扇贝柱蛋白质热变性规律及其与水分状态的内在联系。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

扇贝 购于淄博水产市场。

Q2000 差示扫描量热仪 美国 TA 公司;PQ001 核磁共振分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司;SK3310LHC 超声波清洗器 上海科导超声波仪器有限公司;YET-620 高精度温度仪 兴化市苏玛电器仪表有限公司;PL203 电子天平 梅特勒-托利多仪器有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅 龙口市先科仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 参考 Zhu 等^[8]的方法,清洗扇贝、取柱,扇贝柱长度、直径和质量分别为(1.064 ± 0.067)cm、(1.212 ± 0.003)cm 和(3.792 ± 0.752)g。用滤纸轻轻吸去扇贝柱表面水分,密封后置于 4 °C 冰箱中冷藏待用。将 100 g 扇贝柱置于含有蒸馏水的烧杯中,料液比(w/w)为 1:4,然后将其置于超声波清洗器。US 组:超声频率 35 kHz,功率 180 W,处理时间 30 min;CK 组:超声频率 0 kHz,功率 0 W,处理

时间 30 min。预处理后扇贝柱沥干表面水分, 冷藏待用。

1.2.2 蛋白质变性动力学参数测定 参考 Ishiwatari 等^[18]的方法, 采用 DSC 测定扇贝柱蛋白质加热变性参数。分别准确称取 US 和 CK 预处理后的扇贝柱 5~7 mg, 置于 DSC 铝质坩埚中并密封, 以空坩埚为对照。DSC 扫描程序: 升温速率 β 分别设定为 3.0、6.0、9.0、12.0、15.0、18.0、21.0 °C/min, 将样品由 25 °C 升温至 90 °C。根据 DSC 曲线确定蛋白质变性温度(即峰值温度, T_D)和蛋白质变性焓(ΔH)。

1.2.3 蛋白质变性数值模拟 根据二态模型假说, 蛋白质加热变性速率与未变性蛋白质浓度呈比例, 假设蛋白质变性遵循一级化学反应动力学方程^[17]:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad \text{式 (1)}$$

式中: k 为蛋白质热变性速率常数, 1/min; C 为未变性蛋白质的浓度, mol/g; t 为扇贝柱加热时间, min。

将加热 t 时刻扇贝柱未变性蛋白质的浓度除以初始未变性蛋白质的浓度(即无量纲化), 得到式(2), 简化后得到式(3)^[18]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{C_t}{C_0} \right) = \frac{dX}{dt} = -k(T) \frac{C_t}{C_0} = -k(T)X \quad \text{式 (2)}$$

$$\ln X = -k(T)t \quad (0 \leq X \leq 1) \quad \text{式 (3)}$$

式中: C_0 为初始未变性蛋白质的浓度, mol/g; C_t 为加热 t 时刻未变性蛋白质的浓度, mol/g; X 表示 C_t/C_0 , 为未变性蛋白质比; T 为绝对温度, K。

加热过程中, 扇贝柱不同位置温度分布不均匀, k 与温度关系遵循 Arrhenius 方程^[19]:

$$k = Z \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad \text{式 (4)}$$

式中: Z 为指前因子; E_a 为反应活化能, kJ/mol; R 为气体常数, 9.314 J/(mol·K)。

DSC 测试中以恒定速率加热, 加热温度和加热时间之间关系见式(5)^[18]:

$$dT = \beta dt \quad \text{式 (5)}$$

式中: β 为升温速率, °C/min。

根据式(2)、(4)和(5), 得到式(6)^[13]:

$$\beta \frac{dX}{dt} = -ZX \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad \text{式 (6)}$$

式(6)进一步微分, 得到式(7)^[18]:

$$\beta \frac{d^2 X}{dT^2} = - \left(-\frac{Z}{\beta} \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) + \frac{E_a}{RT^2} \right) X \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad \text{式 (7)}$$

假设加热温度为 T 时, 蛋白质残余变性焓值为 ΔH_T , 初始蛋白质变性焓为 ΔH_0 , 则未变性蛋白质比计算方法见式(8)^[18]。

$$X = \frac{\Delta H_T}{\Delta H_0} \quad \text{式 (8)}$$

DSC 扫描曲线表示 $d(\Delta H_T)/dt$, 它是温度(T)或时间(t)的函数, 反映未变性蛋白质比和吸收峰值的相关函数, 当温度 T 达到蛋白质变性的峰值温度(T_{Dmax})时, 可用式(9)表示^[16]:

$$\left. \frac{d^2 X}{dT^2} \right|_{T=T_{Dmax}} = 0 \quad \text{式 (9)}$$

为模拟扇贝柱在干燥过程中的蛋白质热变性规律, 基于式(7)和(9), T_D 与蛋白质变性动力学参数 Z 、 E_a 关系如式(10)所示^[20]:

$$\ln \left(\frac{\beta}{T_D^2} \right) = \ln \left(\frac{ZR}{E_a} \right) - \left(\frac{E_a}{RT_D} \right) \quad \text{式 (10)}$$

扇贝柱蛋白质变性动力学参数可通过 Ozawa 曲线得到, 即: 以 $-\ln(\beta/T_D^2)$ 对 $1/T_D$ 作图得到一条直线, 根据直线的斜率和截距计算确定 E_a 和 Z 。

参考 Fan 等^[17]的方法计算蛋白质变性程度, 根据式(3)和(4), 换算得到式(11)。根据式(11)计算扇贝柱任意位置的未变性蛋白质比, $X(t)$ 。扇贝柱总的未变性蛋白质比(X_{Total})根据式(12)计算:

$$X(t) = \exp \left(-Z \exp \left(\frac{-E_a}{RT(t)} \right) \right) t \quad \text{式 (11)}$$

$$X_{Total}(t) = P_1 X_1 + P_2 X_2 \quad \text{式 (12)}$$

式中: X_1 为未变性肌球蛋白比; X_2 为未变性肌动蛋白比; P_1 和 P_2 为肌球蛋白和肌动蛋白比例, 其值可通过 DSC 测试得到的各蛋白质吸热焓的比值得到^[16]。

1.2.4 蛋白质变性数值模拟 根据 DSC 测试结果, 分别得到扇贝柱肌球蛋白(T_{Dm})和肌动蛋白变性温度(T_{Da})。参考 Mao 等^[16]的方法, 设定略高于 T_{Dm} 和 T_{Da} 的水浴温度(55.00 °C 和 85.00 °C), 将热耦插入扇贝柱几何中心处后, 装入铝箔袋中尽可能去除袋内至少 95% 的空气, 密封置于水浴中加热, 使扇贝柱几何中心温度达到 T_{Dm} 或 T_{Da} 时开始计时, 根据公式(11)对扇贝柱蛋白质变性数值模拟, 计算得到扇贝柱几何中心蛋白质变性程度分别达到 25%、50%、75% 和 100% 时所需的时间, 达到加热时间的扇贝柱迅速取出, 密封后置于冰水中迅速冷却。

1.2.5 LF-NMR 分析 利用 LF-NMR 测定 1.2.4 中扇贝柱加热过程中不同蛋白质变性程度的扇贝柱样品的横向弛豫时间(T_2)和峰面积比(A_2)。参照 Zhu 等^[8]的方法, 采用多脉冲回波序列(Carr-Purcell-Meiboom-Gill, CPMG)测定 T_2 。测试参数: 温度 32 ± 0.03 °C, 磁体强度 0.55 T, 质子共振频率 20 MHz, 采样频率 SW=100 kHz, 累加采样次数 NS=4, 等待时间 TW=3000 ms, 90°射频脉宽 P1=5.52 μs, 180°射频脉宽 P2=11.20 μs, 回波个数 NECH=300, 回波时间 TE=0.6 ms。CPMG 指数衰减曲线采用 Multi Exp Inv Analysis 分析软件进行综合迭代算法完成反演,

参照 Cheng 等^[21]的方法对弛豫图谱数据和反向弛豫峰面积进行质量归一化处理。

1.3 数据处理

所有实验至少平行 3 次,数据表示为“平均值±标准差”。采用 SPSS 软件进行方差分析和 Duncan 多重比较检验,在 95% 的置信区间评估平均值之间的差异。采用 Origin 软件进行 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 蛋白质变性动力学参数测定

扇贝柱典型 DSC 扫描图谱如图 1 所示,图中有 2 个明显的吸热峰。根据 Llave 等^[15]的研究,判断第 1 个峰对应扇贝柱肌球蛋白变性温度,第 2 个峰对应肌动蛋白变性温度。利用每个吸热峰面积除以对应测试样品质量计算得到对应样品的 ΔH 值。由图 1 可知,CK 和 US 组扇贝柱肌球蛋白变性的 T_D 值分别为 53.45 °C 和 54.12 °C,肌动蛋白的 T_D 值分别为 78.74 °C 和 78.78 °C。这一结果与 Llave 等^[15]和 Paredi 等^[22]对扇贝柱蛋白质变性研究结果一致。其中,US 预处理导致扇贝柱蛋白质热变性温度升高。US 处理时产生的声空化作用导致物料微尺度局部产热,进而引起肌球蛋白发生不可逆变性。与本文研究一致,US 辅助氯化钠湿腌制牛肉过程中,功率高于 100 W 时,肌球蛋白变性温度消失^[23]。Uddin 等^[24]在扇贝肉 DSC 扫描曲线中观测到 3 个峰值,扇贝种类和生长环境可能是造成这种差异的主要原因。

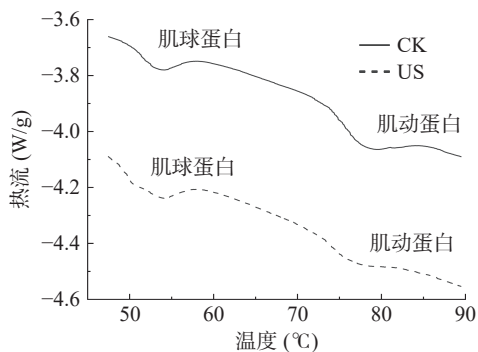


图 1 扇贝柱 DSC 扫描图谱

Fig.1 DSC scanning thermograms of scallop adductors
注:升温速率 9 °C/min。

扇贝柱在 DSC 设定的升温速率下(见 1.2.2)扫描测试,获得 T_D 。以 $-\ln(\beta/T_D^2)$ 对 $1/T_D$ 作图,结果见图 2。由图 2 可知,不同升温速率数据分布于一条直线,根据直线斜率和截距,得到扇贝柱蛋白质变性动力学参数 E_a 和 Z 值,结果如表 1 所示。CK 和 US 组肌球蛋白 E_a 值分别为 305.3 和 281.6 kJ/mol,肌动蛋白 E_a 值分别为 285.0 和 273.4 kJ/mol。此外,CK 和 US 组肌球蛋白 Z 值分别为 2.43×10^{49} 和 $3.86 \times 10^{45} \text{ min}^{-1}$,肌动蛋白 Z 值分别为 6.62×10^{42} 和 $1.90 \times 10^{41} \text{ min}^{-1}$ 。这意味着,扇贝柱肌球蛋白 E_a 和 Z 值都高于肌动蛋白,US 处理可降低肌球蛋白和肌动蛋白

E_a 和 Z 值。此外,随着升温速率(β)的增加,蛋白质 T_{Dmax} 值均向更高的温度移动。日本对虾^[16]和鳕鱼^[25]的蛋白质热变性研究中,肌球蛋白 E_a 和 Z 高于肌动蛋白这一结论与本研究吻合。

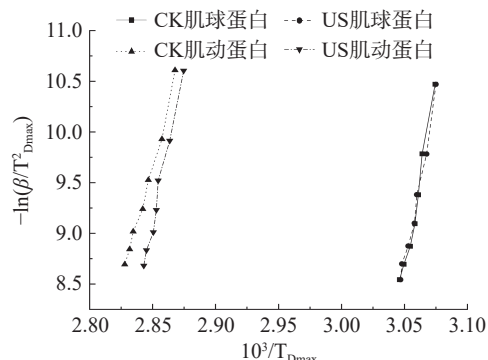


图 2 扇贝柱肌球蛋白和肌动蛋白热变性的 Ozawa 曲线
Fig.2 Ozawa plots for myosin and actin thermal denaturation of scallop adductors

表 1 扇贝柱肌原纤维蛋白热变性动力学参数

Table 1 Kinetics parameters of the myofibrillar protein thermal denaturation of scallop adductors

参数	肌球蛋白		肌动蛋白	
	CK	US	CK	US
$Z(\text{min}^{-1})$	2.43×10^{49}	3.86×10^{45}	6.62×10^{42}	1.90×10^{41}
$E_a(\text{kJ/mol})$	305.3	281.6	285.0	273.4

图 3 为扇贝柱由 25.00 °C 加热至 90.00 °C 过程中非变性蛋白质比变化曲线。由曲线拐点可得每种蛋白质的 T_D 值。首先,假设非变性蛋白质比无限接近 1(即 0.999)时为蛋白质变性的开始,在非变性蛋白质比为 0.001 时定义为蛋白质变性的结束^[15]。根据式(2)计算得到未变性蛋白质比,将扇贝柱中每种蛋白质峰值随温度变化函数进行量化。如图 3 所示,当加热温度逐渐升高到蛋白质变性温度时,扇贝柱蛋白质结构发生不可逆变化。CK 组肌球蛋白变性在 32.50 °C 时开始,55.00 °C 时完全变性;肌动蛋白在 51.25 °C 时开始变性,77.50 °C 时完全变性。由图 3 曲线可以得到 DSC 测定的峰值温度 T_D 所对应的拐点,由拐点可得肌球蛋白的 T_D 为 47.50 °C,肌动蛋白 T_D 为 66.25 °C。这些值与图 1 中所示 DSC 的 T_D 值接近。因此,可以验证本文所得蛋白质变性动力学参数的准确性。

此外,温度 32.50 °C 时扇贝柱肌球蛋白开始发生变性,意味着在超过 32.50 °C 加热或干燥条件下,扇贝柱中水分被去除的同时,肌球蛋白已经发生变性。蛋白质变性导致肌原纤维收缩进而加剧加热或干燥过程中样品的收缩。因此,当设定加热温度低于 32.50 °C 时,扇贝柱肌球蛋白未发生变性,进而可以推测样品收缩程度低(即体积比高)。扇贝柱热泵干燥温度为 15、30 和 45 °C,干燥至样品水分比为 0.14~0.15 时,体积比分别为 0.70、0.66 和 0.63(本研

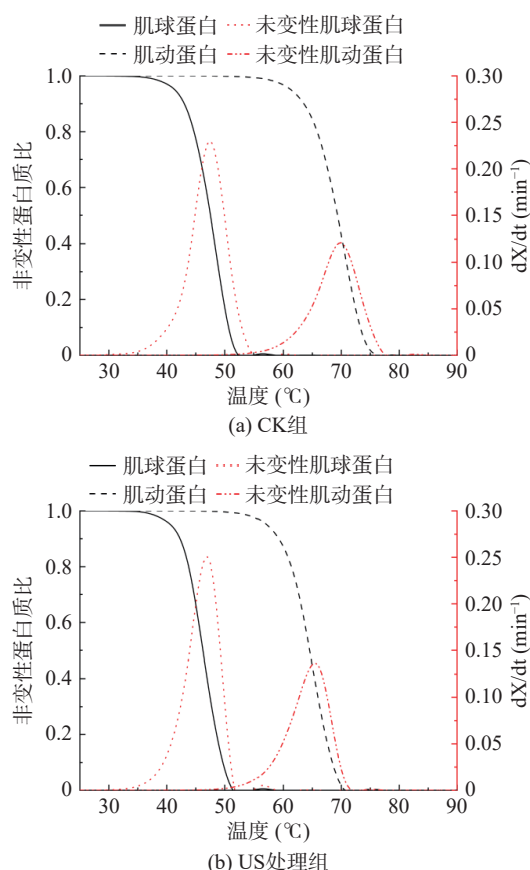


图 3 升温速率 9 °C/min 时扇贝柱肌球蛋白和肌动蛋白非变性蛋白质比变化曲线

Fig.3 Calculated changes of the non-denaturation ratio of myosin and actin of scallop adductors during heating at 9 °C/min

究团队实验结果,数据尚未公开)。Mao 等^[16]利用 DSC 测定日本对虾蛋白质加热变性,同样证明了蛋白质变性动力学参数的准确性。根据非变性蛋白质比曲线,可以利用每种蛋白质的动力学参数来确定任意温度下该蛋白质的热变性速率常数^[16]。

扇贝柱蛋白质变性过程不仅与温度和升温速率有关,还与 US 预处理密切相关。本文探究了 US 预处理对扇贝柱蛋白质加热变性(即样品几何中心处非变性蛋白质比的变化)的影响,结果如图 3(b)所示。可以看出,同一加热温度下,US 预处理显著降低了扇贝柱肌动蛋白变性程度。例如,CK 组肌动蛋白在 45 °C 时部分变性(43.36%),而 US 预处理组肌动蛋白在 45.00 °C 时达到 31.25% 变性。表明 US 预处理可以抑制肌动蛋白加热变性。因此,US 预处理对扇贝柱蛋白质加热变性的抑制,是 US 预处理能够有效提高扇贝柱热泵干燥效率、改善部分质构特性的主要原因之一^[8,26]。

2.2 扇贝柱蛋白质变性数值模拟

肌球蛋白和肌动蛋白是扇贝柱肌原纤维蛋白的主要组成成分。为了获得扇贝柱蛋白质随加热温度变性规律,计算出每种蛋白质在任意温度下的加热变性动力学。通过加热模拟监测肌球蛋白和肌动蛋白非变性蛋白质比^[27]。设定加热温度略高于肌球蛋白和肌动蛋白变性温度(即 55.00 或 85.00 °C)的恒温

水浴,扇贝柱几何中心温度和未变性蛋白质比随加热时间变化曲线见图 4。由图 4(a)可知,55.00 °C 恒温加热时,CK 组扇贝柱几何中心温度达到 54.25 °C,肌球蛋白在 222.07 s 完全变性,而肌动蛋白在整个过程中几乎未发生变性;然而,85.00 °C 恒温加热时,扇贝柱几何中心温度达到 83.57 °C,接近肌动蛋白的峰值变性温度。肌球蛋白迅速发生变性,在 84.10 s 时完成变性。图 4(b)为 US 预处理扇贝柱几何中温度曲线和未变性蛋白质比曲线。与 CK 组温度曲线相似,但 US 预处理后的扇贝柱缩短了处理时间。与 CK 组相比,US 预处理后的扇贝柱几何中心升温速度更快。55.00 °C 恒温加热时,US 处理组扇贝柱几何中心温度达到 55.62 °C,肌球蛋白在 315.93 s 内完全变性,而肌动蛋白在整个过程中几乎未发生性;但是,85.00 °C 恒温加热时,中心温度达到 85.05 °C,接近肌动蛋白的峰值变性温度。肌球蛋白迅速发生变性,在 130.36 s 时完成变性。

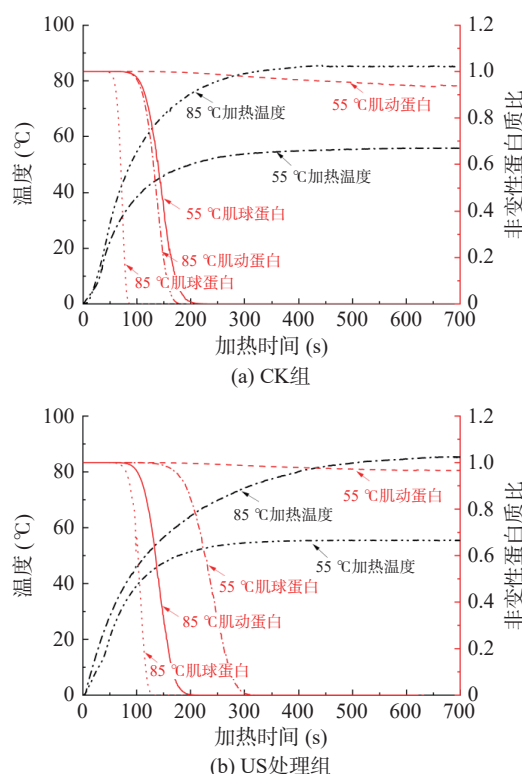


图 4 扇贝柱 55.00 和 85.00 °C 加热时温度变化和未变性蛋白质比曲线

Fig.4 Change in temperature and calculated protein non-denaturation degree in scallop adductors when heating at 55.00 and 85.00 °C

因此,根据蛋白质变性模拟曲线,可以得到任意温度下扇贝柱内部蛋白质变性程度,为对应加热或干燥温度下的扇贝柱内部结构变化提供参考信息。Mao 等^[16]研究日本对虾加热变性曲线时发现,85 °C 加热温度下,虾肉肌球蛋白完全变性时间为 160 s,肌动蛋白完全变性时间为 440 s。水产品品种、成分组成和生存环境可能是造成蛋白质变性温度差异的主要原因^[28]。根据建立的拟合曲线,当

US 预处理扇贝柱在恒温 15 或 30 ℃ 下进行干燥时,肌球蛋白和肌动蛋白在干燥过程中不会发生变性。而当扇贝柱在恒温 45 ℃ 下进行干燥时,CK 组扇贝柱肌球蛋白非变性蛋白质比为 0.53,而肌动蛋白非变性蛋白质比为 0.99;US 处理组肌球蛋白非变性蛋白质比为 0.54,而肌动蛋白非变性蛋白质比为 0.99。US 预处理有效缓解了扇贝柱蛋白质加热变性。CK 组扇贝柱蛋白质变性降低了肌肉品质特性,使肌肉纤维收缩,从而导致组织结构致密且质地变硬^[19]。赵亚等^[26]认为,超声波耦合乙醇预处理导致扇贝柱干制品品质特性得以改善,这可能与该处理可减轻蛋白质降解和蛋白质变性密切相关。这与本文研究结论吻合。

2.3 低场核磁共振分析

LF-NMR 作为检测食品中水分状态和分布的技术,能够为不同预处理和加热温度处理后肉类组织中水分状态的改变提供参考^[8]。扇贝柱组织由 4 种不同状态的水分组成,标记为 T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 的 4 个弛豫峰,分别表示强结合水、弱结合水、不易流动水和自由水。这 4 个弛豫峰的峰面积比例表示为 A_{2b} 、 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} ,分别代表强结合水、弱结合水、不易流动水和自由水的比例^[6]。扇贝柱水分组成见表 2。由表 2 可知,同一温度下,随着肌球蛋白和肌动蛋白变性程度增加, T_{2b} 和 T_{21} 在小范围内波动; T_{22} 和 T_{23} 随变性程度的增加而减小。例如,55.00 ℃ 加热时,CK 组肌球蛋白变性程度由 0 增加至 100% 时, T_{22} 由 69.34 ± 0.22 ms 减少至 62.95 ± 0.46 ms, T_{23} 由 1327.52 ± 20.15 ms 减少至 821.43 ± 16.39 ms; 85.00 ℃ 加热时,CK 组肌球蛋白变性程度由 0 增加至 100% 时, T_{22} 由 69.34 ± 0.22 ms 减少至 52.95 ± 0.84 ms, T_{23} 由 1327.52 ± 20.15 ms 减少至 511.59 ± 9.15 ms。扇贝柱模拟变性过程中,蛋白质变性导致结构中用于氢键的带电离子减少,从而导致肌原纤维

溶胀减少^[29]。水结合能力降低,造成 T_{22} 和 T_{23} 弛豫时间缩短,水分少量流失^[30]。

如表 2 和图 5 所示,US 预处理扇贝柱 T_{22} 表现出更低的弛豫时间和更小的峰面积占比。例如,扇贝柱 55.00 ℃ 加热,肌球蛋白变性程度由 0 增加至 100% 时, T_{22} 由 68.36 ± 0.64 ms 降低至 60.04 ± 0.87 ms; A_{22} 由 97.29% 减少至 91.33%; 85.00 ℃ 加热时,肌球蛋白变性程度由 0 增加至 100% 时, T_{22} 由 68.36 ± 0.64 ms 减少至 51.34 ± 0.70 ms; A_{22} 由 97.29% 减少至 91.10%。扇贝柱 US 处理后,蛋白质二级结构发生膨胀,导致疏水基团暴露^[26,31]。US 处理通过诱导氧化还原反应和能量代谢来加速蛋白质结构的展开^[32]。US 预处理扇贝柱 T_{22} 表现出更低的弛豫时间,但在蛋白质变性模拟过程中,扇贝柱仅有少量水分流失,因此,US 预处理对 T_{2b} 和 T_{21} 的影响并不显著,且由于不易流动水向自由水转化处于动态平衡, T_{23} 变化并不显著。Stadnik 等^[33]应用 US 处理牛肉时,牛肉后熟过程中水分状态发生相似的变化。

2.4 蛋白质变性 with LF-NMR 参数的相关性

通过 Pearson 相关分析,揭示扇贝柱蛋白质加热变性与水分状态间的相关性。如图 6 所示,肌球蛋白和肌动蛋白变性程度与 T_2 和 A_2 显著相关($P < 0.05$)。55 和 85 ℃ 加热时,肌球蛋白和肌动蛋白变性程度始终与 T_{22} 、 T_{23} 和 A_{22} 呈负相关,这主要是由于当加热温度超过扇贝柱肌球蛋白和肌动蛋白的变性温度时,扇贝柱组织中肌原纤维结构遭到破坏,存在于肌原纤维外晶格中的不易流动水和存在于细胞间隙的自由水受到影响,随变性程度增加水分逐渐流失。当加热温度为 85 ℃,随着加热时间延长,扇贝柱不易流动水流失,所占比例逐渐下降(图 5),扇贝柱肌动蛋白变性程度与 A_{21} 和 A_{23} 呈正相关。扇贝柱受热导致肌原纤维结构变化,肌原纤维结构与细胞中水的分布密切相关,水分迁移受蛋白质变性的影

表 2 扇贝柱蛋白质变性程度对弛豫时间的影响(ms)

Table 2 Effect of protein denaturation degree of scallop adductors on the transverse relaxation time (ms)

温度	变性程度(%)	T_{2b}		T_{21}		T_{22}		T_{23}	
		CK	US	CK	US	CK	US	CK	US
55 ℃ 肌球蛋白	0	0.23 ± 0.02^{abc}	0.22 ± 0.01^{bc}	1.54 ± 0.18^{cd}	1.42 ± 0.06^d	69.34 ± 0.22^a	68.36 ± 0.64^a	1327.52 ± 20.15^b	1284.36 ± 27.82^c
	25	0.19 ± 0.01^d	0.23 ± 0.01^{abc}	1.49 ± 0.12^{cd}	1.41 ± 0.07^d	67.48 ± 0.40^b	66.41 ± 0.18^{bc}	1144.68 ± 7.08^d	1084.37 ± 41.49^e
	50	0.23 ± 0.01^{bc}	0.24 ± 0.01^{ab}	1.58 ± 0.09^{cd}	1.48 ± 0.17^{cd}	65.95 ± 0.64^c	62.33 ± 0.88^d	943.79 ± 13.90^f	1644.68 ± 38.10^a
	75	0.23 ± 0.01^{abc}	0.23 ± 0.02^{abc}	1.96 ± 0.12^{bcd}	1.66 ± 0.12^{bcd}	63.95 ± 0.20^d	61.17 ± 1.09^e	880.49 ± 12.91^g	766.34 ± 11.95^i
	100	0.21 ± 0.01^c	0.22 ± 0.02^{bc}	1.41 ± 0.04^d	1.70 ± 0.07^{bcd}	62.95 ± 0.46^d	60.04 ± 0.87^e	821.43 ± 16.39^h	817.23 ± 16.23^h
85 ℃ 肌球蛋白	25	0.24 ± 0.01^{ab}	0.24 ± 0.02^{ab}	1.45 ± 0.13^{cd}	1.65 ± 0.23^{bcd}	62.95 ± 0.76^d	56.79 ± 0.63^g	541.59 ± 5.78^{jk}	471.38 ± 8.90^l
	50	0.22 ± 0.02^{bc}	0.24 ± 0.01^{ab}	2.65 ± 0.3^{ab}	1.47 ± 0.13^{cd}	58.73 ± 0.75^f	54.79 ± 0.56^h	539.76 ± 8.47^{jk}	439.76 ± 18.15^{lm}
	75	0.24 ± 0.01^{ab}	0.22 ± 0.01^{bc}	2.41 ± 0.07^b	2.58 ± 0.12^b	54.79 ± 1.15^h	52.95 ± 0.59^i	519.36 ± 13.25^{jk}	580.52 ± 33.09^j
	100	0.23 ± 0.01^{abc}	0.21 ± 0.01^c	2.77 ± 0.09^{ab}	2.57 ± 0.04^{ab}	52.95 ± 0.84^{ij}	51.34 ± 0.70^j	511.59 ± 9.15^k	471.38 ± 18.06^l
	25	0.22 ± 0.01^{bc}	0.23 ± 0.01^{abc}	1.38 ± 0.12^d	2.65 ± 0.09^{ab}	62.95 ± 1.01^d	58.73 ± 0.78^f	880.49 ± 13.12^g	439.76 ± 17.93^{lm}
85 ℃ 肌动蛋白	50	0.21 ± 0.01^c	0.24 ± 0.01^{ab}	1.85 ± 0.11^{bcd}	2.50 ± 0.15^{ab}	62.95 ± 0.20^d	58.73 ± 0.91^f	1162.32 ± 8.95^d	410.27 ± 7.17^m
	75	0.24 ± 0.01^{ab}	0.21 ± 0.02^c	1.70 ± 0.07^c	2.97 ± 0.11^a	58.73 ± 1.12^f	58.73 ± 0.41^f	439.76 ± 8.88^m	333.13 ± 19.28^n
	100	0.25 ± 0.01^a	0.23 ± 0.02^{abc}	2.12 ± 0.16^{bcd}	2.18 ± 0.17^b	54.79 ± 0.38^h	51.11 ± 1.13^j	333.13 ± 9.16^n	270.50 ± 6.23^o

注:同一弛豫时间下不同预处理组两列数据不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

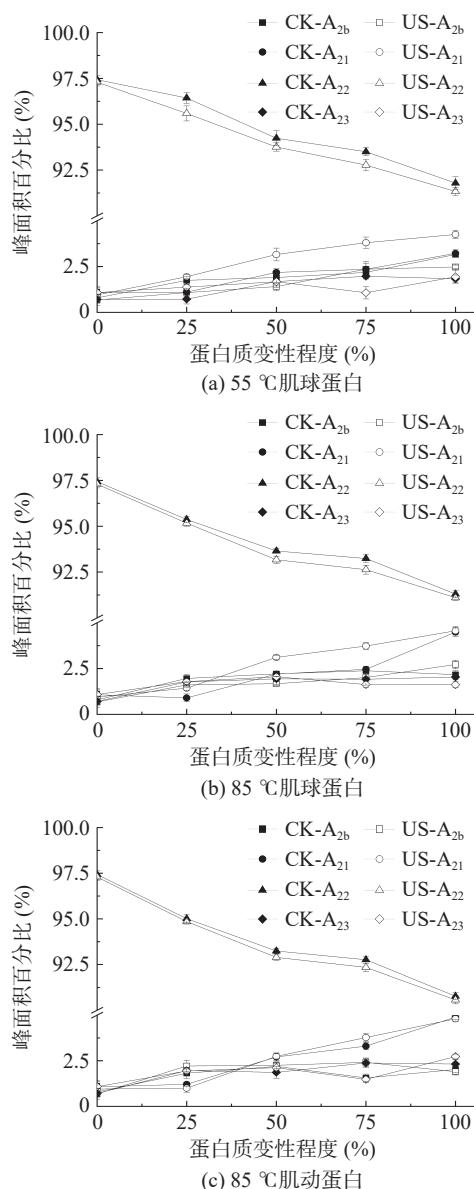


图5 扇贝柱蛋白质变性程度对弛豫时间峰面积百分比的影响

Fig.5 Effect of protein denaturation degree of scallop adductors on peak area percentage of transverse relaxation time

响。Li 等^[34]研究了真空低温慢煮(样品中心温度 41、50、59、68 °C, 时间 10、20、30、40 min)和传统烹饪方法(样品中心温度 100 °C)对带鱼水分状态和微观结构的影响, 研究表明, 与传统烹饪方法相比, 真空低温慢煮带鱼不易流动水增加 2.36%±0.33%; 真空低温慢煮较传统烹饪方法水分迁移速率降低, 微观结构破坏较少; 加热导致的蛋白质变性与水状态密切相关。因此, 通过监测扇贝柱水分状态和分布, 可以提供有关扇贝柱肌球蛋白和肌动蛋白变性的有用信息。

3 结论

扇贝柱肌球蛋白初始变性温度 32.50 °C, 完全变性需要 55.00 °C; 肌动蛋白初始变性温度 51.25 °C, 完全变性需要 77.50 °C。US 预处理导致肌球蛋白变性温度和肌动蛋白变性温度都提高了 3.75 °C。US

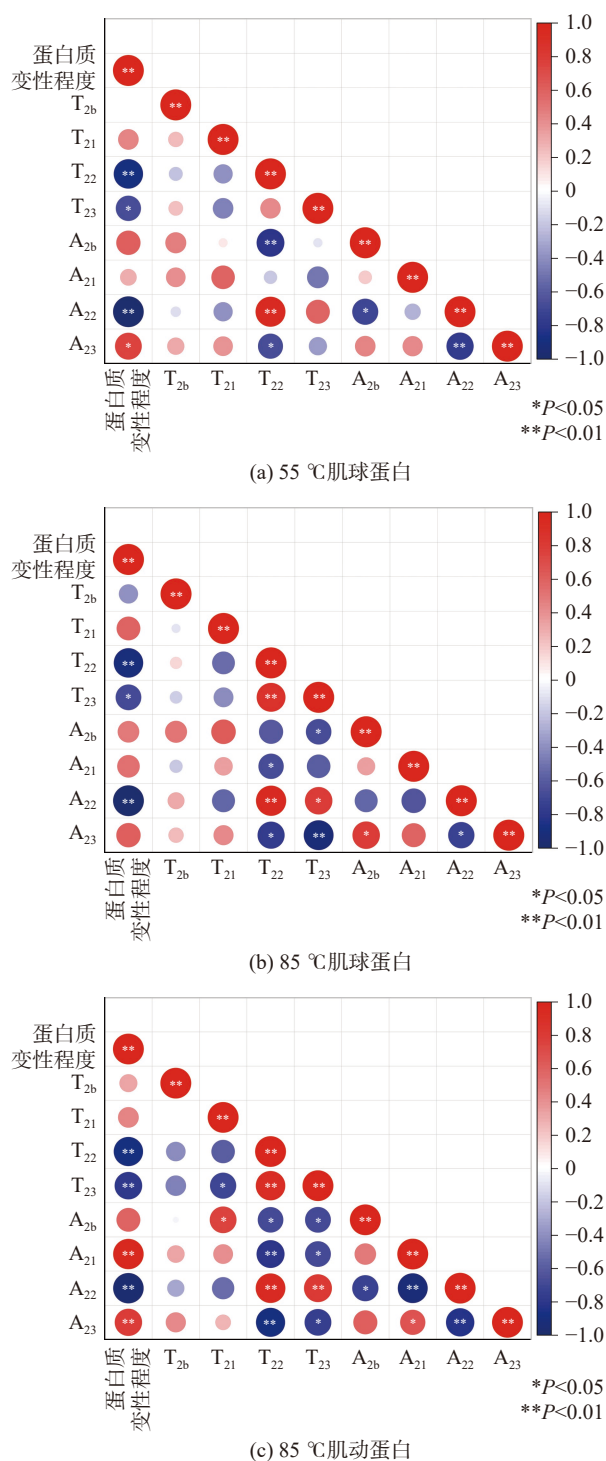


图6 扇贝柱蛋白质热变性与 LF-NMR 参数的相关性

Fig.6 Correlation coefficient analysis between proteins thermal denaturation and LF-NMR parameters of scallop adductors

预处理延缓扇贝柱蛋白质变性。LF-NMR 表明, 随着蛋白质变性程度增加, T_{2b} 和 T_{21} 弛豫时间波动范围较窄, T_{22} 和 T_{23} 弛豫时间降低。 T_{22} 比例随蛋白质变性程度增加而显著降低, T_{2b} 和 T_{21} 比例略有增加, 而 T_{23} 比例维持动态稳定状态。相比于对照组, US 预处理降低了 T_{22} 弛豫时间及其所占比例。肌动蛋白和肌球蛋白变性程度始终与 T_{22} 、 T_{23} 和 A_{22} 呈负相关。本研究可为阐明扇贝柱加工尤其干燥过程中品质变化规律提供理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 赵亚, 朱智壮, 石启龙, 等. 成膜预处理提高扇贝柱超声波辅助热泵干燥效率及品质[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 274–283. [ZHAO Ya, ZHU Zhizhuang, SHI Qilong, et al. Coating pretreatment improved drying efficiency and quality attributes of ultrasonic assisted heat pump dried scallop adductors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 274–283.]
- [2] 赵亚, 朱智壮, 刘静, 等. 超声波预处理时间对扇贝柱热泵干燥动力学及品质特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(21): 93–101. [ZHAO Ya, ZHU Zhizhuang, LIU Jing, et al. Effect of ultrasonic pretreatment time on the drying kinetics and quality attributes of heat pump-dried scallop adductors[J]. *Food Science*, 2022, 43(21): 93–101.]
- [3] 朱智壮, 张越翔, 刘静, 等. 亲水胶体成膜预处理对扇贝柱热泵干燥动力学与品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 55–60. [ZHU Zhizhuang, ZHANG Yuexiang, LIU Jing, et al. Effects of hydrocolloids coating pretreatment on drying kinetics and quality attributes of heat pump dried scallop adductors[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 55–60.]
- [4] 王舒娴, 杜瀚, 林端权, 等. 不同干燥方式对低盐腌制鲍鱼复水及品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(10): 57–65. [WANG Shuxian, DU Han, LIN Duanquan, et al. Effects of different drying methods on the rehydration and quality characteristics of low-salt pickled abalone[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(10): 57–65.]
- [5] LIU Jing, ZHAO Ya, SHI Qilong, et al. Water distribution, physicochemical and microstructural properties of scallop adductors as affected by different drying methods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 115: 104966.
- [6] WU Xiaotian, ZHAO Ya, SHI Qilong, et al. Effects of ethanol pretreatment on drying kinetics and quality attributes of scallop adductors during heat pump drying[J]. *Drying Technology*, 2023, 41(9): 1514–1531.
- [7] 刘静, 赵亚, 石启龙. 果蔬和水产品新型干燥预处理技术研究进展及未来展望[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(10): 32–42. [LIU Jing, ZHAO Ya, SHI Qilong. Research progress and future prospects of novel pretreatment technologies for the drying of fruits and vegetables and aquatic products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(10): 32–42.]
- [8] ZHU Z Z, ZHAO Y, ZHANG Y X, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the drying kinetics, water status and distribution in scallop adductors during heat pump drying[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(15): 6239–6247.
- [9] 姜珊珊, 刁志杰, 蒋慧丽, 等. 低温真空慢煮加工对半壳扇贝肌肉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(4): 70–77. [JIANG Shanshan, DIAO Zhijie, JIANG Huili, et al. Effect of low temperature vacuum slow cooking on muscle quality characteristics of half shell scallop[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(4): 70–77.]
- [10] CHEN Wenqing, MA Haile, WANG Yaoyao. Recent advances in modified food proteins by high intensity ultrasound for enhancing functionality: Potential mechanisms, combination with other methods, equipment innovations and future directions[J]. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2022, 85: 105993.
- [11] LI Na, ZHANG Kexin, DU Jiayi, et al. High-intensity ultrasound improved the physicochemical and gelling properties of *Litopenaeus vannamei* myofibrillar protein[J]. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2022, 90: 106217.
- [12] KIM Y J, LEE M H, KIM S M, et al. Improvement of structural, physicochemical, and rheological properties of porcine myofibrillar proteins by high-intensity ultrasound treatment for application as Pickering stabilizers[J]. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2023, 92: 106263.
- [13] LI Zhiyu, WANG Jianyi, ZHENG Baodong, et al. Impact of combined ultrasound-microwave treatment on structural and functional properties of golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myofibrillar proteins and hydrolysates[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 65: 105063.
- [14] JIN G F, LIU Y Y, ZHANG Y, et al. Underlying formation mechanism of ultrasound-assisted brined porcine meat: The role of physicochemical modification, myofiber fragmentation and histological organization[J]. *Ultrasonic Sonochemistry*, 2023, 94: 106318.
- [15] LLAVE Y, MORINAGA K, FUKUOKA M, et al. Characterization of ohmic heating and sous-vide treatment of scallops: Analysis of electrical conductivity and the effect of thermal protein denaturation on quality attribute changes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 112–123.
- [16] MAO W J, LI X L, FUKUOKA M, et al. Study of Ca²⁺-ATPase activity and solubility in the whole kuruma prawn (*Marsupenaeus japonicus*) meat during heating: Based on the kinetics analysis of myofibril protein thermal denaturation[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(9): 1511–1520.
- [17] FAN Hailong, FAN Daming, HUANG Jianlian, et al. Cooking evaluation of crayfish (*Procambarus clarkia*) subjected to microwave and conduction heating: A visualized strategy to understand the heat-induced quality changes of food[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 62: 102368.
- [18] ISHIWATARI N, FUKUOKA M, SAKAI N. Effect of protein denaturation degree on texture and water state of cooked meat[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 117(3): 361–369.
- [19] ELGENDY A E T, ABDEL-ATY A, YOUSSEF A A, et al. Exact solution of Arrhenius equation for non-isothermal kinetics at constant heating rate and n-th order of reaction[J]. *Journal of Mathematical Chemistry*, 2019, 58(5): 922–938.
- [20] OZAWA T. Kinetics analysis of derivative curves in thermal analysis[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1970, 2(3): 301–324.
- [21] CHENG Shasha, TANG Yingqiang, ZHANG Tan, et al. Approach for monitoring the dynamic states of water in shrimp during drying process with LF-NMR and MRI[J]. *Drying Technology*, 2017, 36(7): 841–848.
- [22] PAREDI M E, TOMAS M C, AÑON M C, et al. Thermal stability of myofibrillar proteins from smooth and striated muscles of scallop (*Chlamys tehuatlensis*): A differential scanning calorimetric study[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46: 3971–3976.
- [23] SANCHES M A R, COLOMBO SILVA P M O, BARRETO T L, et al. Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 112036.
- [24] UDDIN M, AHMAD M U, JAHAN P, et al. Differential scanning calorimetry of fish and shellfish meat[J]. *Asian Journal of*

Chemistry, 2001, 13(3): 965–968.

[25] SKIPNES D, der PLANCKEN I V, LOEY A V, et al. Kinetics of heat denaturation of proteins from farmed Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 85(1): 51–58.

[26] 赵亚, 吴小恬, 石启龙. 乙醇耦合其他预处理提高扇贝柱热泵干燥效率及品质[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 72–81. [ZHAO Ya, WU Xiaotin, SHI Qilong. Enhancing the heat pump drying rate and quality attributes of scallop adductors using ethanol coupled with other pre-treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(2): 72–81.]

[27] LLAVE Y, SHIBATA-ISHIWATARI N, WATANABE M, et al. Analysis of the effects of thermal protein denaturation on the quality attributes of sous-vide cooked tuna[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(1): e13347.

[28] LI X L, LLAVE Y, MAO W J, et al. Heat and mass transfer, shrinkage, and thermal protein denaturation of kuruma prawn (*Mar-supenaeus japonicas*) during water bath treatment: A computational study with experimental validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 238: 30–43.

[29] MCDONNELL C K, ALLEN P, MORIN C, et al. The effect of ultrasonic salting on protein and water-protein interactions in

meat[J]. *Food Chemistry*, 2014, 147: 245–251.

[30] WANG Yaoyao, YAN Jingkun, DING Yanhua, et al. Effect of sweep frequency ultrasound and fixed frequency ultrasound thawing on gelling properties of myofibrillar protein from quick-frozen small yellow croaker and its possible mechanisms[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111922.

[31] JIANG Shuai, ZHANG Miao, LIU Hui, et al. Ultrasound treatment can increase digestibility of myofibrillar protein of pork with modified atmosphere packaging[J]. *Food Chemistry*, 2022, 377: 131811.

[32] LÜ Ruiling, LIU Donghong, WANG Wenjun, et al. Proteomic response and molecular regulatory mechanisms of *Bacillus cereus* spores under ultrasound treatment[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 78: 105732.

[33] STADNIK J, DOLATOWSKI Z J, BARANOWSKA H M. Effect of ultrasound treatment on water holding properties and microstructure of beef (*M. semimembranosus*) during ageing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(10): 2151–2158.

[34] LI Yuan, LI Cijian, CHEN Meiyu, et al. Sous-vide cooking endows a better microstructure for hairtail (*Trichiurus lepturus*) than traditional cooking: Mechanisms of moisture migration[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(9): 3953–3964.