

海参冻结过程实验与模拟研究

赵晓宇, 崔晓钰*, 汤振彪

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年6月25日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月29日

摘要

海参因其较高的食疗和药用价值得到消费者的广泛认可, 即食海参作为食用方便的深加工海参制品具有很高的经济价值和广阔的市场前景。然而其在运输、冻藏过程中易发生自溶现象造成品质严重劣变。因此研究其冻结过程对于优化冻结工艺, 提高产品品质, 减少能耗有重要意义。本文建立海参冻结过程数值模型, 考虑了海参的多孔介质基体, 采用变物性参数与等效比热容法预测冻结过程中温度场与水分含量的变化。结果表明: 海参中心温度的模拟与实验值的均方差和为1.24, 冻结时间的相对误差为4.35%, 冻结速率的相对误差为7.06%, 冻结后平均含水率相对误差为0.75%, 说明数值模型与计算方法合理。随后讨论了海参冻结品质的工艺参数(冷冻环境温度, 表面传热系数)的优化, 筛选得到优选工艺参数区间为 $(-40^{\circ}\text{C}, 58.35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}))\sim(-26^{\circ}\text{C}, 108.35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}))$, 此时海参能在30 min内通过最大冰晶生成带的同时具有大于50 mm/h的冻结速率。

关键词

冻结食品, 多孔介质, 海参, 冻结速度

Experimental and Simulation Study on Freezing Process of Trepang

Xiaoyu Zhao, Xiaoyu Cui*, Zhenbiao Tang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 25th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 29th, 2025

Abstract

Trepang is widely recognized by consumers for its high therapeutic and medicinal value, and instant trepang as a convenient and deep-processed trepang product has high economic value and broad market prospect. However, it is prone to autolysis during the transportation and freezing process,

*通讯作者。

文章引用: 赵晓宇, 崔晓钰, 汤振彪. 海参冻结过程实验与模拟研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(7): 238-251.
DOI: 10.12677/mos.2025.147532

causing serious quality deterioration. Therefore, it is important to study the freezing process to optimize the freezing process, improve the product quality and reduce energy consumption. In this paper, we establish a numerical model of the freezing process of trepang, consider the porous medium matrix of trepang, and predict the changes of temperature field and moisture content during the freezing process by using variable physical parameters and equivalent specific heat capacity method. Experimental validation showed that the mean sum of squared differences between the simulated and experimental values of trepang central temperature was 1.24, the relative error of freezing time was 4.35%, the relative error of freezing rate was 7.06%, and the relative error of average moisture content after freezing was 0.75%, indicating that the numerical model matched the calculation method. The optimization of the process parameters (freezing environment temperature, surface heat transfer coefficient) for the freezing quality of trepangs was then discussed, and the preferred process parameters were selected in the range of $(-40^{\circ}\text{C}, 58.35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}))$ to $(-26^{\circ}\text{C}, 108.35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}))$, when the trepangs could pass the maximum ice crystal generation zone within 30 min and had a freezing rate of more than 50 mm/h.

Keywords

Frozen Food, Porous Media, Trepang, Freezing Rate

Copyright © 2025 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

海参是一种棘皮海洋软体动物,我国约有 140 多种海参分布在海洋沿岸处[1]。海参富含多肽、三萜苷、甾醇和多糖[2]等生物活性成分,具有很高的营养价值。目前,海参年产量达 22 万吨左右,产值超过 70 亿美元[3]。研究表明[4]-[6]:食用海参不仅能增强人体免疫力与记忆力,有明显的抗疲劳,抗衰老,调节神经系统等作用。海参离开海水后,由于机械损伤、酶,高温[7]等多种环境因素的影响,极易发生自溶现象(即通过蛋白质分解导致体壁降解),导致海参采后品质严重劣变,失去经济价值。因此,采用合理的加工方法对捕获后的新鲜海参进行贮藏具有重要意义。目前,市场上的海参产品种类有很多种,大多数海参主要被加工成干制品供给市场,在食用时需进行发制与水煮[8]。朱兰兰等[9]研究发现海参经过水煮后,蛋白质、胶原蛋白以及多糖等含量损失较为严重,依次为 44.83%、42.5%、以及 54.35%。高昕等[10]研究发现,海参在 50 至 70 $^{\circ}\text{C}$ 下加工,随着温度的升高,海参总蛋白损失率最高可达 46.12%。相较于传统海参干制品加工方法,以新鲜的海参作为原料,通过高温高压进行短时间热加工的方法制成的即食海参因为其具有食用方便、质构特性良好、营养物质和生物活性成分损失最少等优点而成为热门产品[11]。本文对即食海参的冻结过程进行实验与数值模拟,旨在为海参冷冻工艺的优化与品质的控制提供参考。

食品冻结过程中热物性参数会随着冻结的进行发生变化,使用变物性数学模型[12] [13]。例如 Chaiwanichsirira [14]建立了热物性参数随温度变化的预测模型对鲑鱼肉的冻结过程进行仿真,研究表明该方法所得冻结时间与实测值的相对误差为 1.64%。Vargas [15] [16]使用随温度变化的热导率,比热容,热扩散系数对圆柱形罐头食品的瞬态加热与冷却进行模拟,结果表明使用该模型能够将预测结果的误差控制在 5%以内。冻结过程同时伴随着潜热的释放,而等效比热容法能够将潜热以显热的形式表达出来。Dima 等[17]使用该方法拟合了比热容随温度变化的多项式函数,较好地解决了冻结过程中潜热难以预测的问题。唐婉[18]使用该方法对牛肉冻结时间进行数值计算,结果表明模拟计算的冻结时间与实测值的误

差在 $\pm 10\%$ 以内。海参作为肉质紧密的非孔性食品[19] [20]，水分的转移伴随整个冻结过程，所以在数值模拟时应考虑其中的质量损失。为了避免海参的自溶现象发生，在加工处理时应避免出现机械损伤，因此冻结时不对海参进行切分，对整只海参冻结。

使用合理的手段准确模拟海参的冻结过程能够节省试错成本，指导冻结工艺参数的设计，提高海参冻品品质，具有广泛的应用场景与较高的应用价值。本文使用 CFD 多物理场耦合仿真软件，采用有限差分法对整只即食海参建立物理模型，使用等效比热容法处理相变潜热，引入变物性参数拟合式，耦合热量与质量的传递建立多孔介质海参冻结过程三维数学模型并完成模拟。通过模拟研究海参在冻结过程中内部温度场与水分含量的变化规律，并与实验值进行对比验证。通过控制冻结时间与冻结速率探究海参冻结工艺参数。

2. 实验材料与研究方法

2.1. 实验材料 - 即食刺参

实验所用即食刺参产自黄海北部大连海域(北纬 $38^{\circ}43'\sim 39^{\circ}12'$)，原料为养殖的辽参，单体重 $25\pm 2\text{ g}$ ，盐度 $\leq 15\%$ ，水分含量 $\leq 70\%$ 。海参选用即食刺参如图 1 所示，形状呈椭圆筒状，切面椭圆的长半轴为 53.0 mm，短半轴为 28.0 mm，厚度为 42.0 mm，内部空腔直径为 13 mm，重量为 22.5 g。



Figure 1. Sample of instant trepang
图 1. 即食刺参样品

2.2. 相关参数获取及冷冻实验过程

冷冻实验示意图如图 2，所用仪器及其参数如表 1 所示：

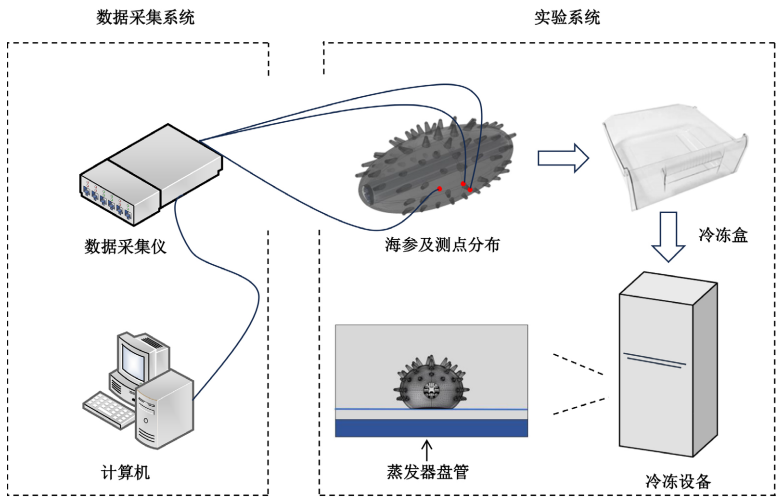


Figure 2. Schematic diagram of the freezing experiment
图 2. 冷冻实验示意图

Table 1. Parameters of experimental equipment
表 1. 实验仪器参数

仪器	型号	误差
电子天平	JCS-3102C	± 0.01 g
真空干燥箱	DZF6216	± 1℃
海尔冰箱	BCD-185	± 2℃
热电偶	TT-T-36	± 0.1℃

将即食海参表面水分擦干, 使用电子天平称重后放入真空干燥箱中干燥(温度 70℃, 真空度 50 kPa) 10 小时。取出干燥后的海参再次进行称重, 随后将其再次放入真空干燥箱中重复上述操作, 直至前后两次称重海参的质量差不超过 2 mg 为止。取 20 个海参进行实验取平均值作为实验用即食海参的含水率。

干基含水率的计算公式为:

$$W_w = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 和 m_1 分别为真空干燥前后实验材料的质量, g。

将即食海参装入无盖冷冻盒。在实验材料上共布置三个温度测点, 其中 T1 热电偶固定在距海参几何中心竖直方向 15.0 mm 处用于测量中心温度; T2 热电偶固定在距几何中心水平方向 23.0 mm 处用于测量皮下温度; T3 热电偶位于海参表皮用于测量表面温度。测点布置示意图如下图 3:

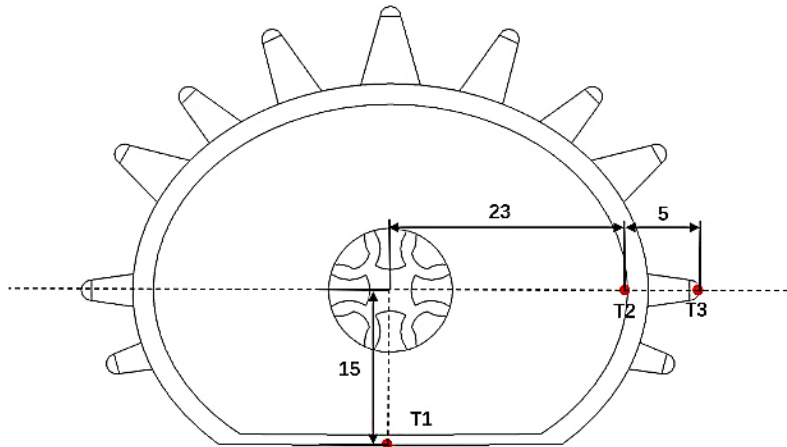


Figure 3. Schematic layout of measurement points (mm)
图 3. 测点布置示意图(mm)

实验前将冰箱空载运行 2 天, 确保冰箱冻结室温度稳定。控制海参表面初始温度均匀一致(初温 20℃) 后, 迅速将固定好热电偶的海参放入冷冻盒中并置于冰箱冷冻室内(冷冻室温度-30℃)进行冻结实验。利用数据记录仪采集其降温数据, 每 5 s 进行一次数据采集, 当海参中心温度降至-30℃时停止记录并导出记录温度数据, 实验重复 3 次, 取平均值。

根据国际制冷协会的定义, 食品冷冻过程中的冻结速率计算公式[21]如下所示:

$$V_f = 3600L / \tau \quad (1)$$

式中, V_f 为冻结速率, mm/h; L 为食品表面与热中心的最短距离, mm; τ 为食品表面达到 0℃至热中心温度到达冰点温度以下 5~10℃时所需的时间, s。

3. 海参数值模型构建

3.1. 研究模型建立

3.1.1. 物理模型

对海参构建几何模型，其尺寸与实验所用海参相同。模型构建如图 4 所示：

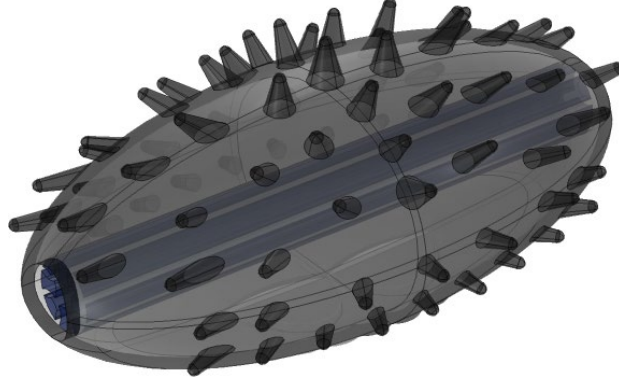


Figure 4. Physical model of trepang
图 4. 海参物理模型

数值模拟所需参数定义如下：

气体的扩散系数表示为[22]：

$$D_{eff,g} = D_{va} (\varepsilon S_g)^{4/3} \quad (3)$$

式中 D_{va} 为二元扩散系数， m^2/s ； ε 为孔隙率； S_g 为气体饱和度。

水分的扩散系数表示为[23]：

$$D_{eff,w} = 1.801 \times 10^{-4} \times \exp\left(\frac{-23.02}{RT}\right) \quad (4)$$

式中， R 为理想气体常数， $J/(mol \cdot K)$ 。

根据文献[24]，本研究选择液相的固有渗透率 $5 \times 10^{-14} m/s$ 。气相的固有渗透率为 $10 \times 10^{-14} m/s$ 。

海参与冷冻室内的空气对流换热的表面传热系数可以利用以下的经验公式[25]进行计算：

当 $1 \times 10^4 \leq Gr \leq 4.6 \times 10^4$ 时：

$$Nu = 0.012 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

当 $Gr \geq 4.6 \times 10^4$ 时：

$$Nu = 0.061 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$Gr = \frac{ga\Delta t l^3}{\nu^2} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (8)$$

$$h = Nu \frac{\lambda}{l} \quad (9)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为体积变化系数; Δt 为物料与空气的温差, $^{\circ}\text{C}$; l 为材料的特征尺寸, m ; ν 为空气运动粘度, m^2/s ; μ 为空气动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; c_p 为空气比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; λ 为材料导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; 在本实验中, 将刺状海参简化为椭圆体结构具有一定合理性。从外形上看, 其整体呈椭圆状, 横断面接近椭圆形。从研究需求来看, 椭圆体模型便于计算分析, 能满足部分研究的精度要求, 所以海参视为椭圆体, 取宽半轴为特征尺寸, 计算得海参表面与冷冻环境之间的表面传热系数为 $18.35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

表 2 为数值模拟所需的物性参数。其中海参的密度, 表观比热容和导热系数拟合式引用文献[26]的结果。该文献研究对象为黄渤海刺参, 实验条件与本研究所用辽参(仿刺参)一致, 其测定的干基含水率范围为 42%~654%, 涵盖本研究即食海参初始含水率 79.64%, 因此其实验数据具有直接适用性。文献通过严格实验方法获取物性参数: 导热系数采用非稳态热线法, 误差控制在 $\pm 5\%$ 内; 比热容通过混合法结合漏热校正, 相对误差约 3.2%; 密度与孔隙率采用排水法和质量法, 孔隙率误差 $\leq 1.5\%$ 。对于液相和气相初始饱和度、渗透率等未直接测量的参数, 本研究基于文献拟合公式计算获得。这些公式经文献实验验证, 可保证参数可靠性。

Table 2. Parameters in numerical simulation

表 2. 数值模拟中的物性参数

参数	符号	数值	参数	符号	数值	参数	符号	数值
截面长半轴/mm	x	53	水分含量/%	ψ	79.64	孔隙率	ε	0.69
截面宽半轴/mm	y	28	密度/ (kg/m^3)	ρ_m	$0.1675W_w + 863.05$	液相初始饱和度	S_w	0.85
空腔直径/mm	ϕ	13	导热系数/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}))$	λ_m	$2.9207 \times 10^{-4}W_w + 0.05377$	气相初始饱和度	S_g	0.15
厚度/mm	δ	42	表观比热容/ $(\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}))$	c_m	$1752 - 4.91W_w$	液相渗透率/ (m/s)	k_w	5×10^{-14}
通用气体常数/ $(\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K}))$	R	8.314	表面传热系数/ $(\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}))$	h	18.35			

3.1.2. 控制方程及边界条件

在建立即食海参冷冻过程的三维数学模型时, 做了以下假设: 1) 海参各向同性且温度和质量在其初始状态均匀分布, 冷冻环境温度恒定。2) 所有的相态在多孔介质中处于局部热力学平衡与局部质量平衡状态。3) 忽略海参在冷冻过程中因体积收缩引起的孔隙率变化对内部水分传递的影响。4) 海参内部由连续的孔道和骨架结构组成, 孔道间气相与液相的水能在介质内部自由迁移。

1、传热方程

对内部固相建立的非稳态传热方程为:

$$(1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = (1-\varepsilon)\nabla(\lambda_s \nabla T_s) + (1-\varepsilon)q_s'' \quad (10)$$

对内部流动项建立的非稳态传热方程为:

$$\varepsilon(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial \tau} + (\rho c)_f u \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla(\lambda_f \nabla T_f) + \varepsilon q_f'' \quad (11)$$

其中下标 s 和 f 分别表示固体项和流动项。

在局部热平衡的假设下, 海参内部各相的温度相同, 因此其热量传递可仅由一个基于 Whitaker [27]

理论的多孔物料传热方程表示:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial \tau} + (\rho c)_f u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) + q'_m \quad (12)$$

$$(\rho c)_m = (1 - \varepsilon) \rho_s c_s + \varepsilon S_w \rho_w c_w + \varepsilon S_g \rho_g c_g \quad (13)$$

$$(\rho c)_f = \varepsilon S_w \rho_w c_w + \varepsilon S_g \rho_g c_g \quad (14)$$

$$\lambda_m = (1 - \varepsilon) \lambda_s + \varepsilon S_w \lambda_w + \varepsilon S_g \lambda_g \quad (15)$$

其中 $(\rho c)_m$ 和 $(\rho c)_f$ 分别为海参和流体的单位体积的表观比热容; λ_m 为海参表观导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; q'_m 为表观内热源产热率, W , 由相变潜热赋值。

海参的底部与冷冻盒接触, 为绝热边界条件, 初始条件为:

$$\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial z} = 0, (\tau > 0, z = 0) \quad (16)$$

海参的其它表面与空气进行对流换热, 边界条件为:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h(T_w - T_f) \quad (17)$$

式中, h 为表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, T_w 为海参表面的温度, $^\circ\text{C}$; T_f 为冷冻环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

2、传质方程

多孔介质中气体和水的质量方程表示为:

$$\frac{\partial c_g}{\partial \tau} + \nabla \cdot n_g = R_{\text{evap}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial \tau} + \nabla \cdot n_w = -R_{\text{evap}} \quad (19)$$

式中 n_g 和 n_w 分别为气体和水的质量通量; $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, c_g 和 c_w 分别为气体浓度和水分浓度; mol/m^3 ; R_{evap} 为水分的蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

气体在多孔介质中的质量通量可以描述为[28]:

$$n_g = u c_g - D_{\text{eff},g} \nabla c_g \quad (20)$$

水在多孔介质中的质量通量可以描述为[28]:

$$n_w = u c_w - D_{\text{eff},w} \nabla c_w \quad (21)$$

水浓度定义为[29]:

$$c_w = S_w \cdot \varepsilon \cdot \rho_w / M_w \quad (22)$$

式中, u 为流体的表观速度, m/s , ε 为孔隙度, ρ_w 为水分的密度, S_w 为水饱和度, M_w 为水的摩尔质量, g/mol ; c_w 为水浓度, mol/m^3 。

冷冻环境温度下的气体浓度定义为[30]:

$$c_g = \frac{610.7 \times 10^6 (7.5 \times (T - 273.1) / (T - 35.8))}{RT} \quad (23)$$

海参冷冻过程的初始条件:

$$c_w(x, y, z; \tau = 0) = c_0 \quad (24)$$

$$c_g(x,y,z;\tau=0) = c_1 \quad (25)$$

边界条件为:

$$-D_{eff,w} \left(\frac{\partial c_w}{\partial n} \right)_w = k_w (c_0 - c_w) \quad (26)$$

$$-D_{eff,g} \left(\frac{\partial c_g}{\partial n} \right)_w = k_g (c_1 - c_g) \quad (27)$$

式中, T 为空气温度, K, c_0 , c_1 分别为初始水浓度与气体浓度, mol/m^3 ; 由式(22) (23)计算得到。

3.2. 网格划分

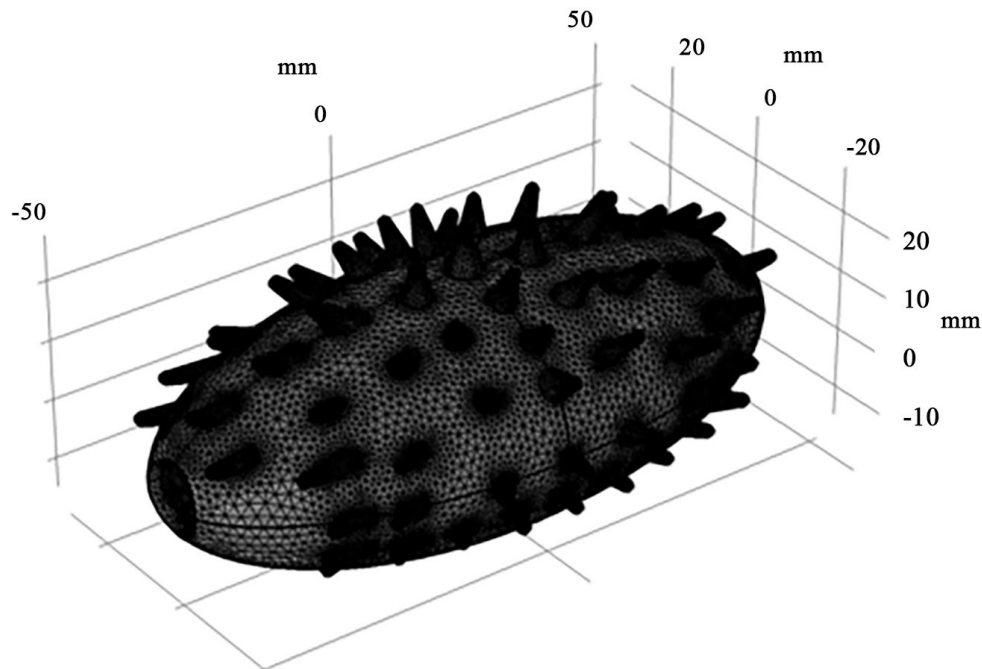


Figure 5. Model mesh generation

图 5. 模型网格划分

根据有限差分法对海参几何模型进行网格划分如图 5 所示, 其中颜色越深的地方网格质量越高。其中最小单元质量为 0.54, 平均单元质量为 0.89。

4. 模型求解

4.1. 数值计算结果及分析

4.1.1. 温度测点对比结果

数值模拟海参冻结过程, 测点位置与实验一致。初始温度 20°C , 底部接触冷冻盒, 其余表面与 -30°C 空气对流换热, 模拟至中心达环境温度停止。图 6 显示模拟与实测温度曲线吻合良好, 验证了模型预测能力。冻结过程分三阶段: 快速降温至冰点、相变段(水分凝固释热致降温缓)、二次降温至终温。表面、皮下、中心温度模拟值与实验值的平均方差分别为 1.86、1.06 和 1.24。差异主要在二次降温段, 因实际冰箱温度受热释放影响波动, 而模拟假设恒温 -30°C , 导致模拟值偏低。

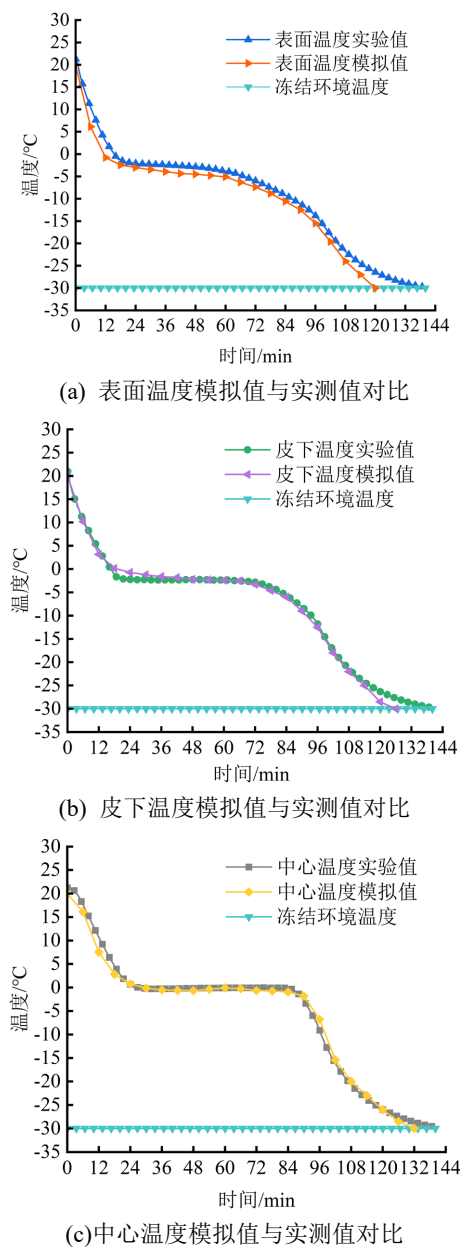


Figure 6. Comparison of experimental and simulated values of trepang temperature at each measurement point
图 6. 海参各测点温度实验与模拟值对比

表 3 为海参冻结速率与冻结时间的实验值与模拟值对比结果，两者相对误差均小于 10%。说明现有的数值模型对于海参冻结过程中的冻结时间和冻结速率均能实现较为准确的预测。

Table 3. Comparison of simulated and experimental values of freezing rate and freezing time in trepangs
表 3. 海参冻结速率与冻结时间模拟及实验结果对比

	模拟结果	实验结果	相对误差
冻结速率/(mm/h)	12.58	11.75	7.06%
冻结时间/min	132	138	4.35%

4.1.2. 模拟温度场结果分析

为观察海参内部温度场，取 YOZ 平面 $X = -1.3, 3.9, 0, 1.3, 3.9$ cm 五个截面。图 7 显示：0 min 时整体 20℃；12 min 后表面剧烈降温开始相变，中心降温慢未达相变；24 min 时中心进入相变，水分结晶，相界面由表及里延伸；90 min 时相变结束，自由水全冻结。随后通过显热换热至中心达-30℃模拟结束。

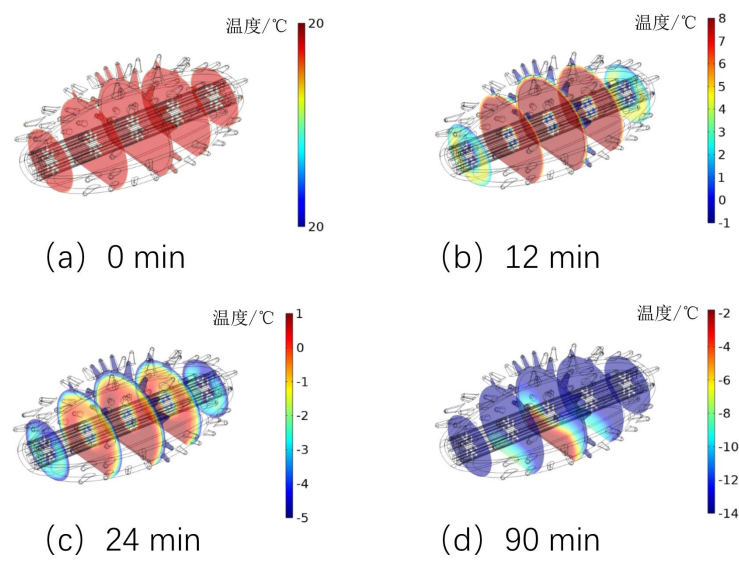


Figure 7. Temperature distribution of internal section of trepang at different moments
图 7. 不同时刻海参内部各切面温度分布

4.1.3. 水分含量对比结果

相同环境下模拟海参冻结水分变化，初始含水率同实验。图 8 显示实验与模拟最终含水率分别为 76.49%和 75.92%，相对误差 0.75%，模型可较好预测水分迁移。平均含水率降幅渐小，因内部水分向冻结表面的迁移量减少。

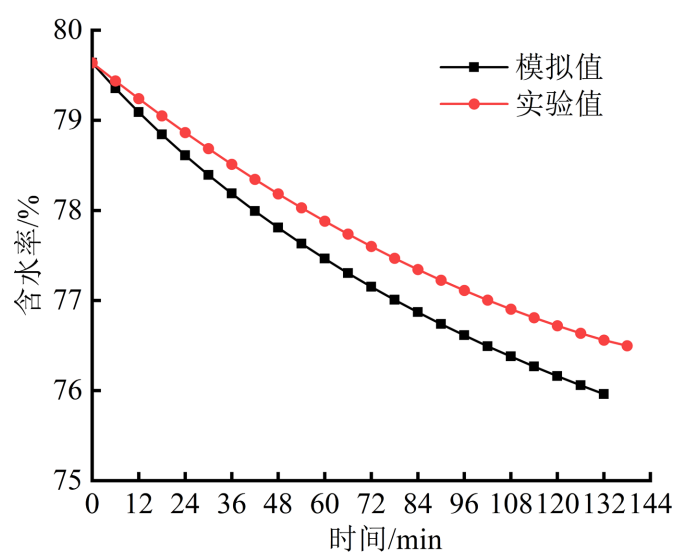


Figure 8. Comparison of simulated and experimental values of water content during freezing of trepangs
图 8. 海参冷冻过程含水率模拟值与实验值对比

4.1.4. 模拟含水率结果分析

取 $X=0$ 处 YOZ 切面观察水分分布如图 9 所示：0 min 时各处初始含水率均为 79.64%。12 min 时，内外表面水分被干燥空气带走致含量下降。24 min 时，表面温度降低及冰晶生成减弱流动性，中心水分分压降低，水分向表面迁移。90 min 时，接触冷冻盒的底面冻结，中心水分除向表面迁移外，也向底面迁移。

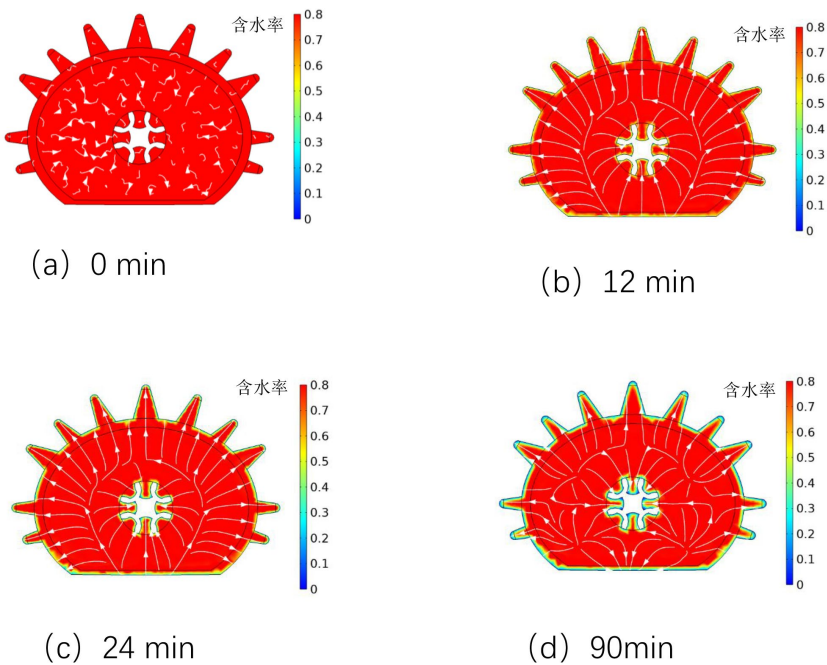


Figure 9. Distribution of water content in the center section of trepang at different moments
图 9. 不同时刻海参中心切面水分分布云图

4.2. 工艺参数对食品冻结品质的影响

改变冻结工艺参数：冷冻环境温度 T 与表面传热系数 h 。探究两者对冻结时间及冻结速率的影响并结合即食海参的品质评价标准对工艺参数进行优选。

质构特性与流变学特性

在冻结过程中，组织内冰晶的大小和分布情况是决定冻结品质的重要因素之一[30]-[32]。其中冰晶主要通过影响海参质构特性和流变学特性如硬度、胶黏性、内聚力、粘附性、咀嚼性、弹性等参数对海参的感官评价起到影响[33]。而冰晶的生成又与冻结时间密切相关。在冻结工艺中，食品在 30 min 内通过最大冰晶生成带($-1^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$)可以在短时间内形成许多微小的晶核，从而形成粒子大小 $0.5\text{ }\mu\text{m}\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 的均匀的冰晶，减少其对生物细胞造成的影响，能够显著提高冻品的品质[33]。随着通过最大冰晶生成带时间的缩短，复温后海产品的色泽，气味，组织形态，肌肉弹性越接近鲜活状态[34]。本节旨在筛选出使即食海参尽快通过最大冰晶生成带的冻结工艺参数，为实际冻结过程提供参考。

使用所建立的海参数值模型进行变工况模拟，海参初始温度为 20°C ，冷冻环境温度在 $-20^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ 的范围内变化，当海参中心温度到达 -5°C 时认为已通过最大冰晶生成带并结束模拟。在食品冷冻过程中，冷冻时间会随着冷冻空气温度的降低和对流换热系数的升高而缩短，但当超过一定临界点后，冷冻时间的变化会变得缓慢。为了保证冷冻食品的质量并减少制冷设备能耗，需要合理匹配冷冻空气温度和对流

换热系数。可以通过调节空气流速实现对流换热系数的改变：在冷冻设备中，空气流速的增加可以显著提高对流换热系数，从而加快冷冻速度。对流换热系数对冻结时间的影响如图 10(a)所示，在五种不同的冷冻环境温度下，曲线呈现出相同的趋势：冻结时间随着对流换热系数的提高先迅速减少然后逐渐趋于稳定。当 $h < 88.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时，冻结时间随 h 的增大而显著减小；而当 $h > 88.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时，继续增大 h 对冻结时间降低平缓。因此在一定范围内增大 h 能够有效缩短冻结时间，但 h 并非越大越好，当超过某临界点后继续增大 h 会带来较大的能量损耗而对减少冻结时间的效果有限。

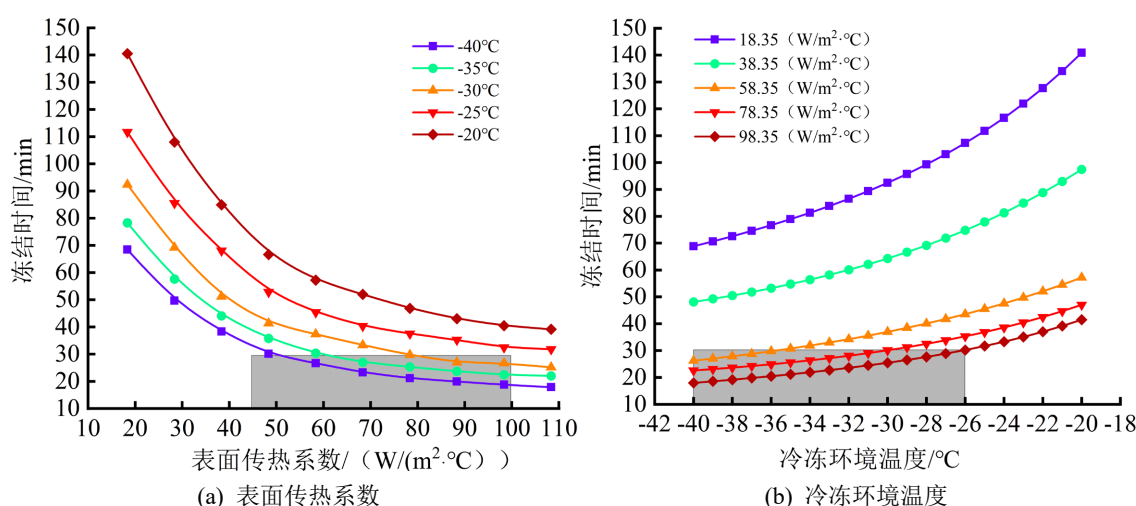


Figure 10. Effect of surface heat transfer coefficient and freezing ambient temperature on freezing time

图 10. 表面传热系数和冷冻环境温度对冻结时间的影响

冷冻环境温度对冻结时间的影响如图 10(b)所示，在五种不同的表面传热系数工况下，随着冷冻环境温度的降低，海参冻结时间逐渐减少，但其减少幅度随着冷冻环境温度的降低而减小。因此当 h 较小时，可以通过降低冷冻环境温度来减少冻结时间，当 h 较大时则不需要过低的环境温度。

5. 结论

本文在 CFD 数值模拟中使用物性参数拟合公式，以等效比热容法处理相变潜热，研究了即食海参在冻结过程中温度场与水分含量的变化。将冻结时间与冻结速率与海参冻结品质结合，获得了冻结工艺参数的优选区间，结论如下：

(1) 建立即食海参的热质传递耦合模型，海参中心、皮下和表面温度的模拟值与实验值均方差和分别为 1.24、1.06 和 1.86；模拟与实验冻结速率的相对误差为 7.06%；冻结时间的相对误差为 4.35%；冻结后含水率的相对误差为 0.75%。验证了计算模型的合理性。

(2) 表面传热系数的增加与冷冻环境温度的降低均能减少冻结时间，但其减少幅度均会逐渐降低。因此盲目地增加 h 或降低 T 会带来较大的能量损耗而对减少冻结时间和提高冻结速率的效果有限。

(3) 筛选出海参能在 30 min 内通过最大冰晶生成带的同时具有大于 50 mm/h 的冻结速率的优选工艺参数区间为 $(-40^\circ\text{C}, 58.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})) \sim (-26^\circ\text{C}, 108.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$ ，即食海参的冻结工艺参数推荐可在上述范围内按需选择。

参考文献

- [1] Zhang, Y., Song, S., Song, D., Liang, H., Wang, W. and Ji, A. (2010) Proliferative Effects on Neural Stem/Progenitor

- Cells of a Sulfated Polysaccharide Purified from the *Sea cucumber Stichopus japonicus*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **109**, 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.07.010>
- [2] Yang, H. and Bai, Y. (2015) Apo *Stichopus japonicus* in the Life of Chinese People. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science*, **39**, 1-23. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-799953-1.00001-5>
 - [3] Liu, Z., Li, D., Song, L., Liu, Y., Yu, M., Zhang, M., *et al.* (2020) Effects of Proteolysis and Oxidation on Mechanical Properties of *Sea cucumber (Stichopus japonicus)* during Thermal Processing and Storage and Their Control. *Food Chemistry*, **330**, Article ID: 127248. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127248>
 - [4] Rodríguez, E., González, M., Caride, B., Lamas, M.A. and Taboada, M.C. (2000) Nutritional Value of *Holothuria forskali* Protein and Effects on Serum Lipid Profile in Rats. *Journal of Physiology and Biochemistry*, **56**, 39-43. <https://doi.org/10.1007/bf03179775>
 - [5] Maier, M.S., Roccatagliata, A.J., Kuriss, A., Chludil, H., Seldes, A.M., Pujol, C.A., *et al.* (2001) Two New Cytotoxic and Virucidal Trisulfated Triterpene Glycosides from the Antarctic *Sea cucumber Staurocucumis liouvillei*. *Journal of Natural Products*, **64**, 732-736. <https://doi.org/10.1021/np000584i>
 - [6] Trotter, J.A., Lyons-Levy, G., Luna, D., Koob, T.J., Keene, D.R. and Atkinson, M.A.L. (1996) Stiparin: A Glycoprotein from *Sea cucumber* Dermis That Aggregates Collagen Fibrils. *Matrix Biology*, **15**, 99-110. [https://doi.org/10.1016/s0945-053x\(96\)90151-1](https://doi.org/10.1016/s0945-053x(96)90151-1)
 - [7] Zhou, D., Chang, X., Bao, S., Song, L., Zhu, B., Dong, X., *et al.* (2014) Purification and Partial Characterisation of a Cathepsin L-Like Proteinase from *Sea cucumber (Stichopus japonicus)* and Its Tissue Distribution in Body Wall. *Food Chemistry*, **158**, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.105>
 - [8] Moon, J.H. and Yoon, W.B. (2016) Size Dependence of the Salting Process for Dry Salted *Sea cucumber (Stichopus japonicus)*. *Journal of Food Engineering*, **170**, 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.09.028>
 - [9] 朱兰兰, 吴晶, 周德庆. 海参的加工利用与品质评价研究进展[J]. 农产品加工, 2015(24): 60-63.
 - [10] 高昕, 刘莲凤, 刘倩, 等. 不同加热温度下刺参肌肉组织与胶原纤维结构的变化[J]. 水产学报, 2012, 36(9): 1465-1472.
 - [11] Matser, A.M., Krebbers, B., van den Berg, R.W. and Bartels, P.V. (2004) Advantages of High Pressure Sterilisation on Quality of Food Products. *Trends in Food Science & Technology*, **15**, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.08.005>
 - [12] Dohrn, R. and Pfohl, O. (2002) Thermophysical Properties—Industrial Directions. *Fluid Phase Equilibria*, **194**, 15-29. [https://doi.org/10.1016/s0378-3812\(01\)00791-9](https://doi.org/10.1016/s0378-3812(01)00791-9)
 - [13] Awuah, G.B., Ramaswamy, H.S. and Economides, A. (2007) Thermal Processing and Quality: Principles and Overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **46**, 584-602. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2006.08.004>
 - [14] Chaiwanichsiri, S., Laohasongkram, K. and Koon-Aree, O. (2001) Freezing Time Prediction for Cuttlefish. *ScienceAsia*, **27**, 221. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2001.27.221>
 - [15] Vargas, P. and Lopez de Ramos, A.L. (2010) Influence of Thermal Properties Accuracy on Transient Conduction Models. 2010 14th International Heat Transfer Conference, Washington, 8-13 August 2010, 105-113. <https://doi.org/10.1115/ihtc14-23129>
 - [16] Vargas, P., Zabala, D. and Ramos, A. (2007) Thermophysical Property Influence in Model Accuracy for the Sterilization Process. 11th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Agios Nikolaos, 23-25 July 2007.
 - [17] Dima, J.B., Santos, M.V., Baron, P.J., Califano, A. and Zaritzky, N.E. (2014) Experimental Study and Numerical Modeling of the Freezing Process of Marine Products. *Food and Bioprocess Processing*, **92**, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.012>
 - [18] 唐婉, 王金锋, 李文俊, 等. 牛肉冻结过程中模拟及热值传递理论分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 117-121.
 - [19] Pham, Q.T., Trujillo, F.J. and McPhail, N. (2009) Finite Element Model for Beef Chilling Using CFD-Generated Heat Transfer Coefficients. *International Journal of Refrigeration*, **32**, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.04.007>
 - [20] Hu, Z. and Sun, D. (2000) CFD Simulation of Heat and Moisture Transfer for Predicting Cooling Rate and Weight Loss of Cooked Ham during Air-Blast Chilling Process. *Journal of Food Engineering*, **46**, 189-197. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(00\)00082-0](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(00)00082-0)
 - [21] Yu, X.L., Li, X.B., Zhao, L., Xu, X.L., Ma, H.J., Zhou, G.H., *et al.* (2010) Effects of Different Freezing Rates and Thawing Rates on the Manufacturing Properties and Structure of Pork. *Journal of Muscle Foods*, **21**, 177-196. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.2009.00175.x>
 - [22] Ni, H. (1997) Multiphase Moisture Transport in Porous Media under Intensive Microwave Heating. Master's Thesis, Cornell University.
 - [23] Hamdami, N., Monteau, J. and Le Bail, A. (2004) Transport Properties of a High Porosity Model Food at above and Sub-Freezing Temperatures. Part 2: Evaluation of the Effective Moisture Diffusivity from Drying Data. *Journal of Food*

- Engineering*, **62**, 385-392. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(03\)00254-1](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00254-1)
- [24] Dadmohammadi, Y. and Datta, A.K. (2020) Food as Porous Media: A Review of the Dynamics of Porous Properties during Processing. *Food Reviews International*, **38**, 953-985. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1761376>
- [25] 张爱琳. 香蕉预冻过程传热性能及真空冷冻干燥工艺优化研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020.
- [26] 赵海波, 戴家傲, 刘焕卫, 等. 刺参物性参数实验研究[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 72-76.
- [27] Roncaratti, L.F. and Aquilanti, V. (2009) Whittaker-Hill Equation, Ince Polynomials, and Molecular Torsional Modes. *International Journal of Quantum Chemistry*, **110**, 716-730. <https://doi.org/10.1002/qua.22255>
- [28] Datta, A.K. (2007) Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. I: Problem Formulations. *Journal of Food Engineering*, **80**, 80-95. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013>
- [29] Datta, A.K. (2007) Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes. II: Property Data and Representative Results. *Journal of Food Engineering*, **80**, 96-110. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.012>
- [30] Huan, Z., He, S. and Ma, Y. (2003) Numerical Simulation and Analysis for Quick-Frozen Food Processing. *Journal of Food Engineering*, **60**, 267-273. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(03\)00047-5](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00047-5)
- [31] Zhang, Z., Sun, D., Zhu, Z. and Cheng, L. (2015) Enhancement of Crystallization Processes by Power Ultrasound: Current State-of-the-Art and Research Advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **14**, 303-316. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12132>
- [32] 蒋沛, 火晓越, 刘宝林, 等. 细胞低温保存过程中冰晶成核的研究进展[J]. 制冷学报, 2020, 41(2): 159-166.
- [33] 杨利艳, 曹文红, 章超桦, 等. 冷冻方式对凡纳滨对虾品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 149-152, 192.
- [34] Cheng, L., Sun, D., Zhu, Z. and Zhang, Z. (2015) Emerging Techniques for Assisting and Accelerating Food Freezing Processes: A Review of Recent Research Progresses. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **57**, 769-781. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1004569>