

南美白对虾中短波红外干燥特性及模型拟合

林雅文¹, 刘佳晨¹, 牛慧玲¹, 谢永康², 励建荣¹, 李学鹏^{1*}

(1. 渤海大学食品科学与工程学院/生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 锦州 121013; 2. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 郑州 450002)

摘 要: **目的** 研究南美白对虾中短波红外干燥(medium-short-wave infrared drying, MSWID)特性及其干燥模型拟合。**方法** 在不同温度下(50、60、70℃)对南美白对虾进行干燥试验, 并以热风干燥(hot air drying, HAD)为对比。采用 8 种常用干燥模型对试验数据进行非线性回归拟合, 确定最佳干燥模型, 并对干燥模型进行验证。并进一步分析不同温度下南美白对虾有效水分扩散系数和干燥活化能。**结果** 南美白对虾 MSWID 过程中, 干燥温度对干燥过程影响显著, 提高干燥温度可提高干燥速率, 加快干燥进程。比较模型评价指标发现, Two-term exponential 模型可以很好的拟合南美白对虾干燥数据, 模型预测值和试验值误差仅为 2.09%, 可较准确的预测干燥过程中南美白对虾的水分变化规律。二阶多项式回归方程可预测水分比随干燥温度和时间的变化。随着干燥温度的升高, MSWID 和热风干燥的有效水分扩散系数分别从 $2.3721 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.3027 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 升高到 $3.4027 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $3.1794 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 活化能分别为 16.5703 kJ/mol 和 14.7839 kJ/mol。**结论** MSWID 干燥时间更短, 干燥速率更快。Two-term exponential 模型可真实、准确地描述 MSWID 和 HAD 下南美白对虾的干燥过程。本研究可为南美白对虾 MSWID 干燥过程的预测和控制提供理论依据。

关键词: 南美白对虾; 中短波红外干燥; 干燥特性; 干燥模型; 有效水分扩散系数

Medium-short-wave infrared drying characteristics and model fitting of *Penaeus vannamei*

LIN Ya-Wen¹, LIU Jia-Chen¹, NIU Hui-Ling¹, XIE Yong-Kang², LI Jian-Rong¹, LI Xue-Peng^{1*}

(1. College of Food Science and Technology, Bohai University/National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, China; 2. Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: Objective To study the medium-short-wave infrared drying (MSWID) characteristics and model fitting for *Penaeus vannamei*. **Methods** The drying experiment of *Penaeus vannamei* was carried out at different temperatures (50, 60, 70℃), and hot air drying (HAD) was considered as a control, 8 kinds of commonly drying models were adopted to fit the experimental data by nonlinear regression to determine the optimal drying model which was verified by experimental data. The effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}) and drying activation

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202102)、辽宁省博士科研启动基金计划项目(2022-BS-303)、河南省农业科学院优秀青年科技基金项目(2022YQ23)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32202102), the Doctoral Research Fund of Liaoning Province (2022-BS-303), and the Excellent Youth Science and Technology Fund of Henan Academy of Agricultural Sciences (2022YQ23)

***通信作者:** 李学鹏, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: xuepengli8234@163.com

***Corresponding author:** LI Xue-Peng, Ph.D, Professor, College of Food Science and Technology, Bohai University/National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, China. E-mail: xuepengli8234@163.com

energy of *Penaeus vannamei* at different drying temperatures were further analyzed. **Results** The drying temperature had a significant effect on the drying process of *Penaeus vannamei*, and increased drying temperature could increase the drying rate and speed up the drying process. Two-term exponential model fitted the drying data of *Penaeus vannamei* best by comparing the model evaluation indexes. The error between the predicted value and the experimental value was only 2.09%, indicating better prediction of the moisture variation during the drying process of *Penaeus vannamei*. The second order polynomial regression equation could be used to predicted the moisture ratio change caused by drying temperature and drying time. With the increase of drying temperature, the D_{eff} of MSWID and HAD increased from $2.3721 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $2.3027 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ to $3.4027 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ and $3.1794 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively, and the activation energies were 16.5703 kJ/mol and 14.7839 kJ/mol, respectively. **Conclusion** MSWID has shorter drying time and faster drying rate. The Two-term exponential model can describe the drying process of *Penaeus vannamei* under MSWID and HAD accurately. This study can provide a theoretical basis for the prediction and control of *Penaeus vannamei* drying process under MSWID.

KEY WORDS: *Penaeus vannamei*; medium-short-wave infrared drying; drying characteristics; drying model; effective moisture diffusion coefficient

0 引言

南美白对虾(*Penaeus vannamei*), 又名凡纳滨对虾, 目前已成为世界上养殖量最多的虾品种, 占当今世界虾类产量的 80%^[1]。南美白对虾不仅抗病能力强、产量高, 而且具有丰富的营养价值。鲜虾体表带有多种细菌, 体内含有较高水分, 体内酶类在常温下活性强, 在运输、加工和贮藏等环节易发生腐败和黑变, 降低产品价值^[2]。干制是南美白对虾主要加工方式之一, 虾干制品营养丰富、风味独特, 口感优良且运输方便, 发展前景良好^[3]。

热风干燥(hot air drying, HAD)具有操作简单、成本低廉及对设备、环境及操作技术要求低等优点, 目前被广泛应用于水产品干制加工, 但其仍存在内部水分散失不均匀、能耗和温度过高容易造成产品热损失和热氧化^[4]。微波干燥(microwave drying, MD)具有很强的穿透能力、干燥速率高, 能抑制微生物的生长和相关酶的活性, 但干燥过程不易控制^[5]。真空冷冻干燥(vacuum freeze drying, VFD)可以较好的保持食品的色、香、味、形及营养成分, 适用于热敏性和易氧化食品的干燥, 但能耗高、设备造价昂贵, 干燥成本高^[6]。中短波红外是一种 1.4~3.0 μm 范围的电磁波, 通过红外辐射使物料吸收红外产生的热能, 热能通过分子间传递, 分子内能增加, 原子或分子通过热运动发生能级跃迁, 物料内部温度升高, 外部表面温度较低, 从而形成内高外低的温度梯度, 实现快速干燥^[7]。相对传统 HAD, 中短波红外干燥(medium-short-wave infrared drying, MSWID)不需要媒介, 干燥过程中热损失小, 更容易控制, 能显著缩短干燥时间、改善产品品质。目前, MSWID 已成功应用于当归^[8]、红薯^[9]、草莓^[10]、稻米^[11]、猕猴桃^[12]、桑葚^[13]等农产品。

干燥数学模型的研究能够为优化干燥工艺参数、设计

改进干燥设备、降低干燥能耗提供理论依据。目前, 已有关于扇贝^[14]、鲍鱼^[15]、罗非鱼^[16]等水产品干燥特性及动力学模型的研究。员冬玲等^[17]采用过热蒸汽对南美白对虾进行干燥, 得到了不同干燥温度下南美白对虾的有效水分扩散系数及过热蒸汽干燥活化能。FARGANG 等^[18]采用薄层干燥模型研究了虾微波干燥特性, 结果表明, 虾干燥过程中的有效水分扩散系数随微波功率的增加而增加, 同时提升微波功率可以提高干燥效率, 降低单位能耗。KIPCAK^[19]研究了 7 个薄层干燥数学模型对不同微波功率干燥数据进行拟合, 结果表明, Weibull 模型能较好的描述贻贝微波干燥过程。吴靖娜等^[20]使用 13 种常用的薄层干燥数学模型对海马不同干燥方法下的干燥曲线进行拟合, 发现 Page 模型和 Midilli 模型可以很好的描述海马热风干燥过程; Page 模型和 Weibull 模型可以很好的描述海马真空干燥过程; Page 模型、Logarithmic 模型和 Weibull 模型可以准确描述海马冷风干燥过程。然而, 目前关于南美白对虾中短波红外薄层干燥模型的研究鲜有报道。

本研究以南美白对虾为研究对象, 以 HAD 为对照, 研究 MSWID 对南美白对虾干燥特性的影响, 采用非线性回归分析, 确定南美白对虾 MSWID 最适干燥模型, 并分析其水分有效扩散系数和干燥活化能, 以期为提高南美白对虾 MSWID 干制品品质、预测和控制干燥过程提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜活南美白对虾购于辽宁省锦州市水产市场, 于 -20℃冰柜冷冻。

X3-233A 微波炉(广东美的厨房电器制造有限公司);

2100620型中短波红外干燥箱(苏州高鹏自动化设备有限公司);FX 101-0型电热鼓风干燥箱(上海树立仪器仪表有限公司);JCS-31002C电子天平(精度0.01 g,上海浩然电子有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 预处理

选择体型完整,大小均匀一致的带壳南美白对虾,每只质量约为 (24.13 ± 1.56) g,体长约为 (13.56 ± 0.20) cm。解冻后清洗干净,初始湿基含水率为 $(73.83 \pm 1.00)\%$ 。将解冻后的南美白对虾放入微波设备进行熟化,微波功率为500 W,熟化时间3 min,吸水纸去除微波熟化后对虾表面水分,并自然冷却到室温备用,熟化后湿基含水率为 $(68.16 \pm 1.00)\%$ 。

1.2.2 干燥试验

图1为中短波红外干燥箱,主要由中短波红外加热管、托盘和箱体组成。试验过程中,首先将仪器预热至所需温度50、60和70℃,功率为1125 W,将熟化后的南美白对虾平铺于托盘上进行干燥。对照试验于鼓风干燥箱中进行干燥,温度分别设定为50、60和70℃。干燥过程每隔1 h取出称重,直至南美白对虾干基含水率降到20%,停止干燥^[21]。

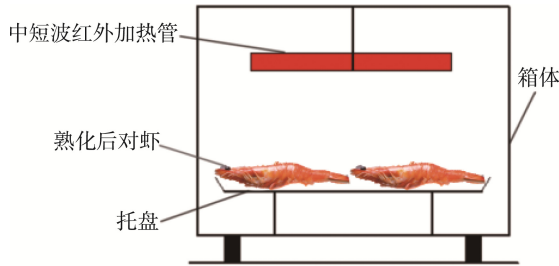


图1 中短波红外干燥示意图

Fig.1 Diagram of MSWID

1.3 干燥参数

1.3.1 干基含水率

用电子天平进行称重,干基含水率计算如公式(1)^[22]所示:

$$\omega_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中, ω_t 为南美白对虾在 t 时刻的含水率,g/g; m_t 为 t 时刻的南美白对虾质量,g; m_d 为干燥处理至恒重时样品绝干质量,g。

1.3.2 水分比

水分比(moisture ratio, MR)计算如公式(2)所示:

$$MR = \frac{\omega_t}{\omega_0} \quad (2)$$

式中, ω_0 为南美白对虾的初始干基含水率,g/g。

1.3.3 干燥速率

干燥速率(drying rate, DR)计算如公式(3)所示:

$$DR = \frac{\omega_{t1} - \omega_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中,DR为干燥速率,g/(g·h); ω_{t1} 为 t_1 时刻的水分含量,g/g; ω_{t2} 为 t_2 时刻的水分含量,g/g; t_2 与 t_1 为干燥时间,min。

1.4 干燥模型

薄层干燥模型是一种在农产品、水产品等干燥过程中应用较为广泛的模型。本研究选择以下8种常用薄层干燥模型(表1)对南美白对虾干燥曲线进行拟合。

表1 8种常用薄层干燥模型
Table 1 Eight kinds of common mathematical thin-layer drying models

模型名称	模型方程	参考文献
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	[21]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[23]
Henderson and pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	[24]
Logarithmic	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	[25]
Two-term exponential	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b \cdot \exp(-k_1 t)$	[26]
Wang and Singh	$MR = 1 + a + bt^2$	[27]
Weibull	$MR = \exp(-(t/a)^\beta)$	[28]
Dincer	$MR = G \cdot \exp(-St)$	[29]

选用决定系数(R^2)、卡方值(χ^2)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来确定模型拟合程度。 R^2 越大, χ^2 和RMSE越小,模型拟合程度越高^[30]。 R^2 、 χ^2 和RMSE计算公式如(4)~(6)所示:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR}_{pre,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}} \quad (6)$$

式中, $MR_{exp,i}$ 为试验水分比; $MR_{pre,i}$ 预测水分比; N 为观察次数; n 为模型中常数个数。

1.5 有效水分扩散系数及干燥活化能

有效水分扩散系数(D_{eff})^[31]描述了水分在不同传输机制(如液体扩散、蒸汽扩散、克努森扩散和静水压差等)下的运动速率,可以根据公式(7)计算:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

式中, t 为干燥时间,s; D_{eff} 为南美白对虾的有效水分扩散系数, m^2/s ; L 是1/2切片厚度,m。

将公式(7)两边取对数得公式(8)。

$$\ln MR = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}\right)t \quad (8)$$

从 $\ln MR$ 与 t 的关系图中,获得斜率为 k 的直线,通过

公式(9)计算得到 D_{eff} 。

$$k = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \quad (9)$$

D_{eff} 和温度(T)的关系可用阿伦尼乌斯公式(10)来表示:

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (10)$$

式中, D_0 为阿伦尼乌斯方程的预指数因子, 为定值, m^2/s ; E_a 为活化能, kJ/mol ; R 为通用气体常数, 为 $8.31451 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为干燥温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

将公式(10)两边取对数得公式(11):

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad (11)$$

式中, E_a 由 D_{eff} 的自然对数与绝对温度的倒数作图计算。

1.6 数据分析

使用软件 Excel 2016 和 Origin 8.0 进行数据处理及统计分析, 利用 MATLAB (9.0, R2016a) 进行模型拟合, 采用 SPSS 16.0 对数据进行显著性分析, 用 Design-Expert 8.0.6 软件进行水分比响应分析, 所有试验均平行 3 次, 试验结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式对南美白对虾干燥特性的影响

由图 2A 可知, 水分比随干燥时间的延长逐渐降低, 在同一方式下, 温度越高, 相同干燥时间内物料的水分比越低。相同温度下, MSWID 的水分比下降速率快于 HAD。这是由于 MSWID 过程中, 南美白对虾内部产生热量, 跟虾外部形成温度差, 当 MSWID 的温度越高, 所形成的温度差越大, 越有利于水分的蒸发, 提高 MSWID 温度, 可以显著提高干燥速率。NOZAD 等^[32]研究留兰香叶片 HAD

和红外干燥过程, 也发现同一方式下, 随着干燥温度的升高, 干燥时间逐渐减少。由图 2B 可知, 南美白对虾的 MSWID 和 HAD 过程均为降速干燥, 随着干燥的进行, 干燥速率快速下降, 水分脱去速率变慢。干燥初期南美白对虾体内自由水快速脱去, 随着干燥进行, 细胞在逐渐失水的过程中形成巨大的渗透压差导致水分迁移, 进而导致干燥速率变慢。相同温度下, MSWID 的干燥速率明显高于 HAD, 主要由于红外辐射穿透力较强, 热辐射能量直接穿透南美白对虾, 而不加热周围空气, 导致南美白对虾的温度梯度在短时间内减小^[13]。结果与 CHEN 等^[33]对 HAD 和 MSWID 过程中枣片的干燥动力学研究相似, 中短波红外干燥过程中红外辐射直接进入物料内部, 辐射能直接转化为热能, 与 HAD 相比, 加热效率升高, MSWID 的干燥时间更短, 干燥速率更高, 并且具有更好的干燥品质。

2.2 干燥方式对南美白对虾有效水分扩散系数的影响

由图 2B 干燥速率可知, 南美白对虾干燥过程由内部水分扩散控制, 降速阶段是主要干燥阶段。通过公式(9)计算有效扩散系数 D_{eff} , 不同温度下 MSWID 和 HAD 的有效扩散系数见表 2。由表 2 可知, R^2 均大于 0.98, 其值越接近于 1, 说明曲线拟合程度越好, 计算出的 D_{eff} 越准确。

当温度为 50、60 和 70°C 时, 随着干燥温度的升高, MSWID 和 HAD 的有效水分扩散系数分别从 $2.3721 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $2.3027 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 升高到 $3.4027 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $3.1794 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。温度对南美白对虾有效水分扩散系数影响显著 ($P < 0.05$), 随着干燥温度的升高, 有效水分扩散系数越大。这主要是因为较高的温度可以加快南美白对虾体内水分子的迅速蒸发, 获得更高的水分扩散系数。陈建福等^[34]在白玉菇 MSWID 特性及动力学模型中也发现, D_{eff} 随着干燥温度的升高而增大, 当干燥温度从 60°C 升高到 90°C 时, D_{eff} 从 $2.7230 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 升高到 $9.0880 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

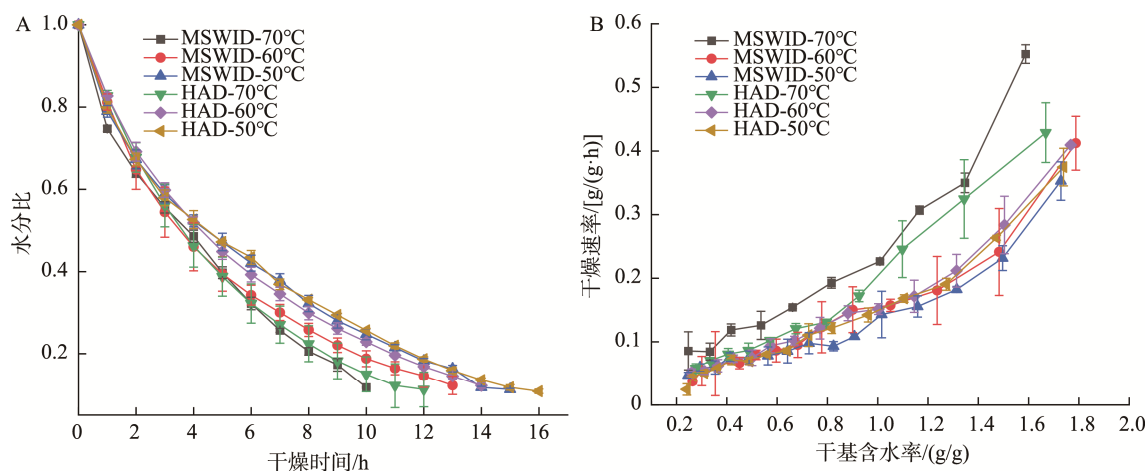


图 2 不同干燥方式对南美白对虾水分比(A)和干燥速率(B)的影响

Fig.2 Effects of different drying methods on moisture ratio (A) and drying rate (B) of *Penaeus vannamei*

表 2 不同干燥方式对南美白对虾有效水分扩散系数的影响
Table 2 Effects of different drying methods on the effective moisture diffusion coefficient of *Penaeus vannamei*

$T/^\circ\text{C}$	斜率 k	R^2	$D_{\text{eff}}/(\text{m}^2/\text{s})$
MSWID-50	-3.8646×10^{-5}	0.9917	$2.3721 \times 10^{-9\text{c}}$
MSWID-60	-4.3425×10^{-5}	0.9953	$2.6753 \times 10^{-9\text{c}}$
MSWID-70	-5.5438×10^{-5}	0.9868	$3.4027 \times 10^{-9\text{a}}$
HAD-50	-3.1576×10^{-5}	0.9966	$2.3027 \times 10^{-9\text{f}}$
HAD-60	-4.0215×10^{-5}	0.9985	$2.4683 \times 10^{-9\text{d}}$
HAD-70	-5.1801×10^{-5}	0.9987	$3.1794 \times 10^{-9\text{b}}$

注: 表中最后一列不同小写字母表示组间差异显著, $P < 0.05$ 。

同一温度下, MSWID 南美白对虾的水分扩散系数式中显著高于 HAD ($P < 0.05$)。随着干燥时间的延长, 物料内水分逐渐减少, 水分迁移的距离增大, 导致失水速率减弱, 与 HAD 相比, MSWID 过程中, 南美白对虾吸收辐射能量, 辐射加热使物料在较短的时间内达到所需温度, 加快水分从内部到表面的扩散速率。CHEN 等^[33]对 HAD 和 MSWID 过程中枣片的干燥动力学研究也发现, 由于 MSWID 过程中红外辐射的快速加热, MSWID 的有效水分扩散系数是 HAD 的 2 倍。

2.3 干燥方式对活化能的影响

干燥活化能表示干燥过程中物料分子脱去单位摩尔的水分所需的最小能量^[35]。根据 Arrhenius 方程, 干燥过程的活化能可由不同温度下的有效水分扩散系数和干燥温度的关系式得到。由图 3 可知, 较高的 R^2 表明 $\ln D_{\text{eff}}$ 与 $1/(T+273.15)$ 具有较好的线性关系。其中 MSWID 和 HAD 的直线回归方程分别为 $y = -1992.94x - 13.71$ ($R^2 = 0.9528$) 和 $y = -1778.08x - 14.42$ ($R^2 = 0.8919$)。根据公式(11)可以求出南美白对虾 MSWID 和 HAD 的活化能分别为 16.5703 kJ/mol

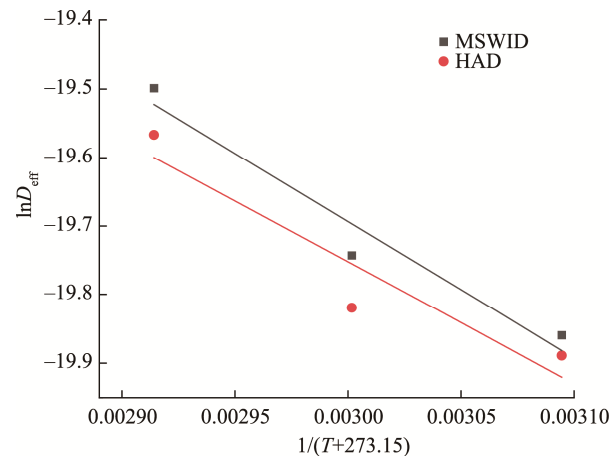


图 3 有效水分扩散系数与干燥温度的关系
Fig.3 Relationship between effective moisture diffusion coefficient and drying temperature

和 14.7839 kJ/mol, 说明干燥过程中去除 1 mol 的水, 需要的最低能量分别为 16.5703 kJ 和 14.7839 kJ。比较可知, HAD 更容易去除水分, 可能由于干燥后期物料蛋白质二级结构发生改变, MSWID 内部 β -折叠向 α -螺旋转化量比 HAD 少, 使内部稳定性保持较好^[36], 阻碍内部水分快速到达南美白对虾表面, 使后期有效水分扩散系数变小, 活化能增大。唐璐璐等^[37]通过不同干燥方式对丰水梨干燥特性及品质的影响研究发现了类似的结果, 丰水梨可溶性糖含量较多, 在中短波红外干燥的红外辐射下可溶性糖随着水向表面溢出, 干燥后期糖阻碍内部水分快速到达物料表面, 使干燥后期的水分有效扩散系数变小, 活化能变大, 丰水梨片热风干燥活化能小于中短波红外干燥活化能。

2.4 干燥方式对干燥模型的影响

2.4.1 干燥模型拟合

决定系数 R^2 越接近 1、 χ^2 和 RMSE 越小, 表明模型拟合程度越高。南美白对虾干燥后 8 个模型拟合结果如表 3 所示。由 R^2 值可知, 南美白对虾干燥 Logarithmic 模型、Two-term exponential 模型、Weibull 模型和 Dincer 模型的 R^2 均在 0.99 以上, 说明这 4 种干燥模型对南美白对虾干燥过程的拟合都较好^[38]。Two-term exponential 模型的 R^2 达到了最高, 为 0.9998。这说明, Two-term exponential 模型可更加真实、准确地描述 MSWID 和 HAD 下南美白对虾的干燥过程, 对实际生产具有很好的预测作用。与魏彦君^[39]在对南美白对虾进行超声波辅助热泵干燥的结果相似, Two-term exponential 模型可以用来描述超声波辅助热泵干燥南美白对虾的特性, 干燥过程拟合较好。

2.4.2 干燥模型验证

为验证 Two-term exponential 干燥模型的准确性, 选取 MSWID 功率 1125 W、干燥温度 65℃的 MR 试验值和热风 65℃与 Two-term exponential 模型计算的 MR 预测值进行比较, 拟合结果如图 4 所示。最大拟合误差为 2.09%, 试验值与模拟值能较好拟合, 说明 Two-term exponential 模型能够较好的表征南美白对虾干燥过程, 可用来定量描述不同温度下南美白对虾干燥过程中水分变化规律。

2.5 响应面统计分析与评价

利用响应面回归模型分析南美白对虾 MSWID 和 HAD 的最佳拟合曲面。水分比方程如公式(12):

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_1x_2 + ex_1^2 + fx_2^2 \quad (12)$$

式中, y 是水分比的预测值, x_1 为干燥时间, x_2 为干燥温度, a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 f 为水分预测数据中的系数。

利用 Design-Expert 软件求解二阶多项式方程, 开发回归模型, 对干燥过程中水分比进行模拟预测。相应的回归方程描述了水分比的预测取决于干燥温度和干燥时间。水分比的预测可以通过程序生成的确定系数来描述数学模

表 3 不同干燥方式下数学模型拟合结果
Table 3 Mathematical model fitting results under different drying methods

模型	温度/°C	R^2	χ^2	RESM	模型系数
Lewis	MSWID-50	0.9861	1.4599×10^{-1}	3.4030×10^{-2}	$k=0.1947$
	MSWID-60	0.9966	7.1069×10^{-2}	1.8078×10^{-2}	$k=0.2426$
	MSWID-70	0.9818	1.2211×10^{-1}	4.0677×10^{-2}	$k=0.2544$
	HAD-50	0.9933	1.0912×10^{-1}	2.3892×10^{-2}	$k=0.2134$
	HAD-60	0.9947	9.9794×10^{-2}	2.2683×10^{-2}	$k=0.2071$
	HAD-70	0.9947	1.3750×10^{-1}	2.9933×10^{-2}	$k=0.2459$
Page	MSWID-50	0.9865	1.5862×10^{-2}	3.3331×10^{-2}	$k=0.2104; n=0.9580$
	MSWID-60	0.9965	6.6781×10^{-2}	1.7887×10^{-2}	$k=0.2361; n=1.0166$
	MSWID-70	0.9819	1.1394×10^{-1}	4.0389×10^{-2}	$k=0.2424; n=1.0312$
	HAD-50	0.9935	1.1384×10^{-1}	2.3767×10^{-2}	$k=0.2192; n=0.9848$
	HAD-60	0.9948	8.6345×10^{-2}	2.1700×10^{-2}	$k=0.1923; n=1.0417$
	HAD-70	0.9965	7.6764×10^{-2}	1.9105×10^{-2}	$k=0.1924; n=1.1535$
Henderson and pabis	MSWID-50	0.9874	1.5005×10^{-1}	3.2320×10^{-2}	$k=0.1885; a=0.9687$
	MSWID-60	0.9966	7.1111×10^{-2}	1.8078×10^{-2}	$k=0.2425; a=0.9998$
	MSWID-70	0.9825	1.2437×10^{-1}	4.0401×10^{-2}	$k=0.2511; a=0.9874$
	HAD-50	0.9938	1.1167×10^{-1}	2.3352×10^{-2}	$k=0.2101; a=0.9847$
	HAD-60	0.9947	9.9456×10^{-2}	2.2679×10^{-2}	$k=0.2073; a=1.0014$
	HAD-70	0.9933	1.2685×10^{-1}	2.8200×10^{-2}	$k=0.2526; a=1.0285$
Logarithmic	MSWID-50	0.9914	6.1257×10^{-2}	2.5875×10^{-2}	$k=0.1497; a=1.0335; c=-0.0920$
	MSWID-60	0.9980	2.7095×10^{-2}	1.3070×10^{-2}	$k=0.2153; a=1.0290; c=-0.442$
	MSWID-70	0.9911	3.3258×10^{-2}	2.7751×10^{-2}	$k=0.1715; a=1.1375; c=-0.1844$
	HAD-50	0.9958	4.2660×10^{-2}	1.8511×10^{-2}	$k=0.1821; a=1.0185; c=-0.0524$
	HAD-60	0.9982	2.4305×10^{-2}	1.2373×10^{-2}	$k=0.1694; a=1.0591; c=-0.0819$
	HAD-70	0.9998	9.3090×10^{-4}	4.1651×10^{-3}	$k=0.1939; a=1.1124; c=-0.1136$
Two-term exponential	MSWID-50	0.9921	5.2953×10^{-2}	2.4891×10^{-2}	$k=0.1616; a=0.9429; b=0.0689; k_1=0.0683$
	MSWID-60	0.9991	1.5072×10^{-3}	8.9730×10^{-3}	$k=-0.4522; a=-0.0001; b=0.9907; k_1=0.2343$
	MSWID-70	0.9931	1.0288×10^{-2}	2.4378×10^{-2}	$k=-0.4124; a=-0.0017; b=0.9653; k_1=0.2241$
	HAD-50	0.9973	6.0041×10^{-3}	1.4954×10^{-2}	$k=0.2009; a=0.9730; b=-0.0003; k_1=-0.3538$
	HAD-60	0.9993	1.7953×10^{-3}	7.6867×10^{-3}	$k=0.1948; a=0.9864; b=-0.0007; k_1=-0.3299$
	HAD-70	0.9998	3.4355×10^{-3}	4.0198×10^{-3}	$k=0.2006; a=1.0880; b=-0.0879; k_1=-0.0012$
Wang and Singh	MSWID-50	0.9787	2.0352×10^{-1}	5.2872×10^{-2}	$a=-0.1411; b=0.0052$
	MSWID-60	0.9845	1.7927×10^{-1}	4.3843×10^{-2}	$a=-0.1738; b=0.0078$
	MSWID-70	0.9847	7.7444×10^{-2}	4.3893×10^{-2}	$a=-0.1872; b=0.0091$
	HAD-50	0.9811	2.3754×10^{-1}	4.9811×10^{-2}	$a=-0.1515; b=0.0060$
	HAD-60	0.9891	1.2838×10^{-1}	3.7502×10^{-2}	$a=-0.1513; b=0.0060$
	HAD-70	0.9955	7.1147×10^{-2}	2.4189×10^{-2}	$a=-0.1772; b=0.0080$
Weibull	MSWID-50	0.9914	1.5839×10^{-2}	3.2072×10^{-2}	$\alpha=6.7182; \beta=1$
	MSWID-60	0.9951	1.5997×10^{-2}	2.5795×10^{-2}	$\alpha=5.5903; \beta=1$
	MSWID-70	0.9902	8.5856×10^{-3}	2.8467×10^{-2}	$\alpha=5.0841; \beta=1$
	HAD-50	0.9947	1.6888×10^{-2}	2.7552×10^{-2}	$\alpha=6.1398; \beta=1$
	HAD-60	0.9976	6.3141×10^{-3}	1.8623×10^{-2}	$\alpha=6.4318; \beta=1$
	HAD-70	0.9997	6.5391×10^{-4}	4.5360×10^{-3}	$\alpha=5.276; \beta=1$
Dincer	MSWID-50	0.9911	8.1157×10^{-3}	2.3509×10^{-2}	$G=0.9398; S=0.1385$
	MSWID-60	0.9937	9.0304×10^{-3}	2.1244×10^{-2}	$G=0.9595; S=0.1706$
	MSWID-70	0.9906	8.1001×10^{-3}	2.5166×10^{-2}	$G=0.9663; S=0.1889$
	HAD-50	0.9935	7.6715×10^{-3}	2.0955×10^{-2}	$G=0.9491; S=0.1535$
	HAD-60	0.9970	2.8111×10^{-3}	1.3960×10^{-2}	$G=0.9663; S=0.1494$
	HAD-70	0.9997	5.8304×10^{-4}	4.2919×10^{-3}	$G=0.996; S=0.1887$

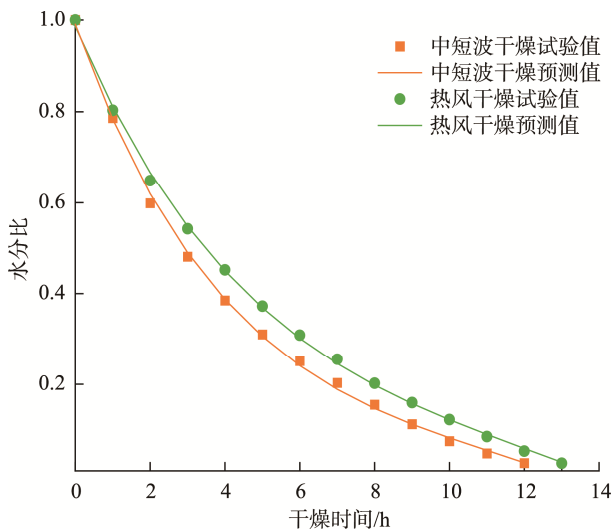


图 4 试验值与预测值的比较
Fig.4 Comparison of experimental and predicted values

型。如图 5 所示,干燥前期,两种干燥方式曲面图较陡,随着干燥的进行,曲面图逐渐平缓,与干燥模型拟合相似,联合温度和时间两个变量,能更好的描述干燥过程中水分比的变化。随着干燥时间的延长和温度的升高,水分比逐渐减小。拟合结果如表 4 所示,分别得出 MSWID 和 HAD 的水分比方程,可以更准确地预测 MSWID 和 HAD 过程中水分比随干燥时间和干燥温度的变化^[40]。

3 讨论与结论

通过试验结果可知,两种干燥方式下,南美白对虾的干燥速率曲线在不同温度下呈现相似的变化趋势,干燥速率随着时间的延长而降低。与HAD相比,MSWID 优于HAD,相同温度条件下南美白对虾达到干燥终点所需的时间较短。干燥过程中MSWID的水分扩散系数和活化能均高于HAD。比较模型评价指标得出,Two-term exponential 模型拟合程度最高,此模型的平均 R^2 值为 0.9968、 χ^2 和 RESM 的最小值分别为 1.5072×10^{-3} 和 4.0198×10^{-3} 。二项式方程模拟了南美白对虾干燥过程中水分比随干燥时间和干燥温度的变化,随着干燥温度的升高和干燥时间的延长,水分比随之减小。

本研究结果表明: Two-term exponential 模型可真实、准确地描述 MSWID 和 HAD 下南美白对虾的干燥过程。二阶多项式方程能够很好的预测南美白对虾干燥过程中水分比的变化。可以为预测南美白对虾 MSWID 和 HAD 的干燥工艺的优化提供理论依据。但研究过程中发现,干燥过程中MSWID所需的活化能大于HAD,未能探明具体原因,后续还需进一步进行研究,并探究不同干燥条件下有效水分扩散系数和活化能的变化规律。MSWID 对南美白对虾干制方式的丰富及干制效率的提高具有积极效果,但仅仅从缩短时间,提高有效水分扩散系数能等角度来选择干燥模型还不足以满足在食品工业体系中广泛应用的要求,还需要从营养成分、活性成分、感官品质及节能减排等多维度加大研究 MSWID 的干燥模型,进一步提高南美白对虾 MSWID 干燥技术的应用价值。

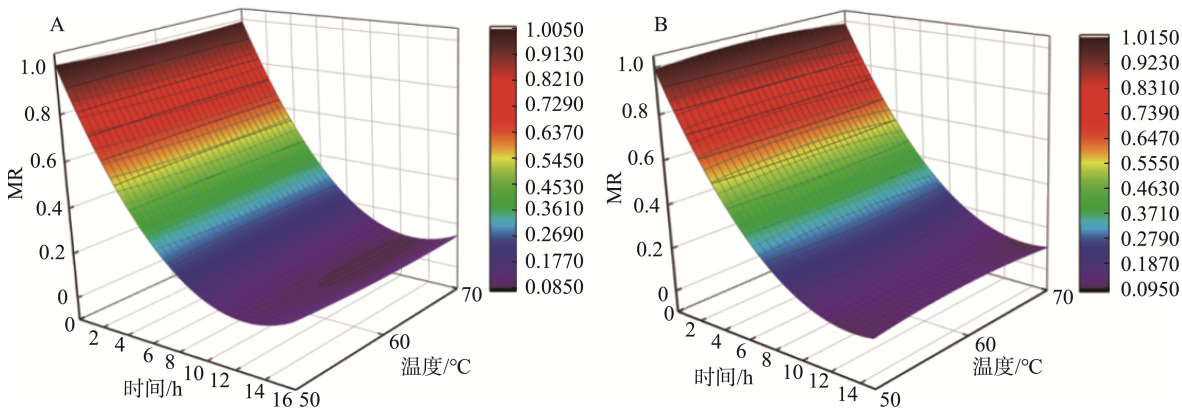


图 5 MSWID (A)和 HAD (B) MR 随温度和时间变化曲面图
Fig.5 Surface diagrams of MR with temperature and time for MSWID (A) and HAD (B)

表 4 回归方程系数值						
Table 4 Coefficient values of regression equations						
干燥方法	a	b	c	d	e	f
MSWID	1.5032	-0.1368	-0.0166	-3.5562×10^{-5}	5.4173×10^{-3}	1.3235×10^{-4}
HAD	0.1061	-0.1305	0.0306	3.7901×10^{-6}	4.7766×10^{-3}	-2.5843×10^{-4}

参考文献

- [1] DEWANGAN NK, GOPALAKRISHNAN A, SHANKAR A, *et al.* Incidence of multiple bacterial infections in Pacific whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquac Res, 2022, 53(11): 3890–3897.
- [2] 傅新鑫. 南美白对虾热加工特性及其预制产品保鲜的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- FU XX. The effect of heating process on the quality of *Penaeus vannamei* and its shelf life during storage [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [3] 赵卉双, 焦顺山, 张振涛, 等. 不同干燥技术及其对水产品品质影响的研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 260–264.
- ZHAO HS, JIAO SS, ZHANG ZT, *et al.* Research progress on drying technology and its effect on quality of aquatic products [J]. Food Ind, 2020, 41(9): 260–264.
- [4] 沈嘉森, 陈晓婷, 苏永昌, 等. 干燥过程对水产干制品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8186–8193.
- SHEN JS, CHEN XT, SU YC, *et al.* Effects of drying process on the quality of dried aquatic products [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(22): 8186–8193.
- [5] CHAIJAN M, PANPIPAT W, NISOA M. Chemical deterioration and discoloration of semi-dried tilapia processed by sun drying and microwave drying [J]. Dry Technol, 2017, 35(5): 642–649.
- [6] NEDIC NM, GOJAK MD, ZLATANOVIC IJ, *et al.* Study of vacuum and freeze drying of bee honey [J]. Therm Sci, 2020, 24(6 Part B): 4241–4251.
- [7] SAKARE P, PRASAD N, THOMBARE N, *et al.* Infrared drying of food materials: Recent advances [J]. Food Eng Rev, 2020, 12(3): 381–398.
- [8] ZHU SQ, GUO S, QIAN DW, *et al.* Modern drying processing method for *Angelicae Sinensis Radix* based on multi-bioactive constituents [J]. China J Chin Mater Med, 2017, 42(2): 264–273.
- [9] POLAT A, TASKIN O, IZLI N. Intermittent and continuous infrared drying of sweet potatoes [J]. Heat Mass Transfer, 2022, 1(13): 1709–1721.
- [10] ADAK N, HEYBELI N, ERTEKIN C. Infrared drying of strawberry [J]. Food Chem, 2017, 219: 109–116.
- [11] WU J, ZHANG H, LI F. A study on drying models and internal stresses of the rice kernel during infrared drying [J]. Dry Technol, 2017, 35(6): 680–688.
- [12] DOYMAZ İ. Infrared drying of kiwifruit slices [J]. Int J Green Energy, 2018, 15(11): 622–628.
- [13] 刘启玲, 王庆卫. 中短波红外干燥对桑葚干燥特性、营养品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 39–45.
- LIU QL, WANG QW. Effects of short-and medium-wave infrared radiation drying on drying characteristics, nutritional quality and antioxidant activity of mulberry [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(12): 39–45.
- [14] 俞微微, 刘俊荣, 沈建, 等. 扇贝闭壳肌薄层干燥的数学模型[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(2): 211–215.
- YU WW, LIU JR, SHEN J, *et al.* Mathematic models of thin layer drying in scallop adductor [J]. J Dalian Ocean Univ, 2015, 30(2): 211–215.
- [15] 张孙现, 池文文. 鲍鱼微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 广东农业科学, 2016, 43(9): 112–118.
- ZHANG SX, CHI WW. Drying characteristics and dynamic model of abalone dried microwave-vacuum equipment [J]. Guangdong Agric Sci, 2016, 43(9): 112–118.
- [16] DUAN Z, JIANG L, WANG J, *et al.* Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating [J]. Food Bioprod Process, 2011, 89(4): 472–476.
- [17] 员冬玲, 耿文广, 杜锐, 等. 南美白对虾过热蒸汽干燥特性及干燥数学模型[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 62–67.
- YUN DL, GENG WG, DU R, *et al.* Drying characteristics and modelling of *Penaeus vannamei* during superheated steam drying [J]. Food Sci, 2020, 41(3): 62–67.
- [18] FARGANG A, HOSAINPOUR A, DARVISHI H, *et al.* Shrimp drying characterizes undergoing microwave treatment [J]. J Agric Sci, 2011, 3(2): 157.
- [19] KIPCAK AS. Microwave drying kinetics of mussels (*Mytilus edulis*) [J]. Res Che Int, 2017, 43: 1429–1445.
- [20] 吴靖娜, 陈晓婷, 潘南, 等. 不同干燥方式下海马干燥特性及其数学模型[J]. 现代食品科技, 2020, 36(12): 133–142.
- WU JN, CHEN XT, PAN N, *et al.* The drying characteristic and mathematical modeling of various drying method of seahorse [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(12): 133–142.
- [21] LI M, AI Z, XIAO H, *et al.* Improvement of drying efficiency and physicochemical quality of kiwifruit slices using infrared-assisted tilted tray air impingement drying [J]. Dry Technol, 2022. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2125526>
- [22] LIN YW, GAO Y, LI A, *et al.* Improvement of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) drying characteristics and quality attributes by a combination of salting pretreatment and microwave [J]. Foods, 2022, 11(14): 2066..
- [23] BUZRUL S. Reassessment of thin-layer drying models for foods: A critical short communication [J]. Processes, 2022, 10(1): 118.
- [24] 程新峰, 潘玲, 李宁, 等. 菊芋微波真空干燥过程的水分扩散特性及模型拟合[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 33–40.
- CHENG XF, PAN L, LI N, *et al.* Moisture diffusivity characteristics and model fitting of jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) during microwave vacuum drying [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(6): 33–40.
- [25] BRASIELLO A, ADILETTA G, RUSSO P, *et al.* Mathematical modeling of eggplant drying: Shrinkage effect [J]. J Food Eng, 2013, 114(1): 99–105.
- [26] TOGRUL İT, PEHLIVAN D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers [J]. J Food Eng, 2002, 55(3): 209–216.
- [27] ABBASPOUR-GILANDEH Y, JAHANBAKHSI A, KAVEH M. Prediction kinetic, energy and exergy of quince under hot air dryer using ANNs and ANFIS [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(1): 594–611.
- [28] YALDIZ O, EREKIN C, UZUN HI. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes [J]. Energy, 2001, 26(5): 457–465.
- [29] KARACABEY E, BUZRAL S. Modeling and predicting the drying kinetics of apple and pear: Application of the Weibull model [J]. Chem Eng Commun, 2017, 204(5): 573–579.
- [30] 张建友, 宋新苗, 陈志明, 等. 中国毛虾红外热风耦合干燥特性及动力

- 学模型研究[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 555–564.
- ZHANG JY, SONG XM, CHEN ZM, *et al.* Drying characteristics and kinetics of *Acetes chinensis* by infrared radiation hot air coupled drying [J]. J Nucl Agric Sci, 2019, 33(3): 555–564.
- [31] 洪森辉, 李辉, 介卓佳. 南瓜片中短波红外干燥特性及薄层干燥模型分析[J]. 现代食品, 2021, (13): 195–200.
- HONG SH, LI H, JIE ZJ. Analysis of pumpkin slice medium and short wave infrared drying characteristics and thin layer drying model [J]. Mod Food, 2021, (13): 195–200.
- [32] NOZAD M, KHOJASTEHPUR M, TABASIZADEH M, *et al.* Characterization of hot-air drying and infrared drying of spearmint (*Mentha spicata* L.) leaves [J]. J Food Meas Charact, 2016, 10(3): 466–473.
- [33] CHEN Q, BI J, WU X, *et al.* Drying kinetics and quality attributes of jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) slices dried by hot-air and short-and medium-wave infrared radiation [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 64(2): 759–766.
- [34] 陈建福, 汪少芸, 林梅西. 白玉菇中短波红外干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 46–53.
- CHEN JF, WANG SY, LIN MX. Drying characteristics and kinetics model of white *Hypsizygus marmoreus* with medium and short wave infrared radiation [J]. J Food Sci Technol, 2021, 39(1): 46–53.
- [35] WANG LX, LAN H, ZHENG QY, *et al.* Drying characteristics and model of jujube in air jet impingement [J]. J Food Sci Technol, 2022, 40(2): 131–140.
- [36] 林雅文, 刘佳晨, 李艾青, 等. 不同干燥方法对南美白对虾理化特性和微观结构的影响[J/OL]. 食品科学: 1–13. [2023-05-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1718.046.html>.
- LIN YW, LIU JC, LI AIQ, *et al.* Effects of different drying methods on physicochemical properties and microstructure of *Penaeus vannamei* [J/OL]. Food Sci: 1–13. [2023-05-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221207.1718.046.html>
- [37] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 不同干燥方式对丰水梨干燥特性及品质的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(11): 2171–2179.
- TANG LL, YI JY, BI JF, *et al.* Drying characteristics and quality of housui pear slices processed using different drying methods [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(11): 2171–2179.
- [38] 许克静, 黄珂, 梁淼, 等. 不同干燥温度下橘皮的干燥特性及香味变化[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 256–265.
- XU KJ, HUANG K, LIANG M, *et al.* The drying characteristics and aroma changes of orange peel at different drying temperatures [J]. Mod Food Sci Technol, 2022, 38(2): 256–265.
- [39] 魏彦君. 南美白对虾超声波辅助热泵干燥动力学及品质特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014.
- WEI YJ. Research on drying kinetics and quality properties of *Penaeus vannamei* dried by ultrasound-assisted heat pump dehumidifier [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014.
- [40] SEREMET L, BOTEZ E, NISTOR OV, *et al.* Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices [J]. Food Chem, 2016, 195: 104–109.
- (责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



林雅文, 博士, 讲师, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。
E-mail: linyawen@163.com



李学鹏, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。
E-mail: xuepengli8234@163.com