

中短波红外干燥温度对南美白对虾干燥特性、虾青素含量和微观结构的影响

林雅文¹, 李艾青¹, 田心怡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 辽宁锦州 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 为探究南美白对虾新型干燥方法,提高干燥速率,改善干制品品质,本研究采用中短波红外干燥(MSWID)技术,分析了其温度(50,60,70℃)对南美白对虾干燥特性、水分活度、有效水分扩散系数、干燥活化能、色泽、质构、虾青素含量及微观结构的影响,用5种常见的干燥模型对干燥曲线进行拟合,并以热风干燥(HAD)为对照。结果表明:随MSWID温度的升高,南美白对虾的干燥时间缩短,干燥速率加快。MSWID在70℃时干燥速率最快,但对南美白对虾的肌纤维破坏严重。60℃时,MSWID比HAD时间缩短2h。MSWID的总色差 $\Delta E(7.8870 \pm 1.6468)$ 与熟化后的样品差异最小,硬度 $[(46.9833 \pm 2.4373) \text{ N}]$ 较好,弹性 $[(2.2067 \pm 0.1172) \text{ mm}]$ 适中。南美白对虾干燥动力学模型拟合表明,Weibull模型拟合度最高($R^2 > 0.9977$),可以较好的描述和预测南美白对虾MSWID过程。南美白对虾MSWID60℃的有效水分扩散系数为 $2.8929 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,高于HAD60℃条件下的有效水分扩散系数 $2.3535 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。综合考虑南美白对虾的干燥效率和干制品品质,60℃是南美白对虾MSWID的最佳温度,此时南美白对虾干燥时间为12h,活化能为 36.4332 kJ/mol ,虾青素含量为 $(42.0933 \pm 0.66214) \mu\text{g/g}$ 。本研究结果可为南美白对虾干燥工艺的改善和提高干制品品质提供理论依据和技术支持。

关键词 南美白对虾; 中短波红外; 干燥特性; 虾青素; 微观结构

文章编号 1009-7848(2023)09-0129-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.09.014

南美白对虾(*Pacific white shrimps*),又名凡纳滨对虾,是当今世界养殖虾类中产量较大的虾种之一,在中国乃至全球的水产养殖业中占有重要地位^[1]。由于其抗病力强、高产以及丰富的营养成分(不饱和脂肪酸、微量元素、虾青素及维生素B₁₂等),在中国被广泛养殖。南美白对虾富含的营养成分有抗肿瘤,降血脂,抗衰老等生物功能,可促进儿童发育,提高人体健康。一般来说,南美白对虾以鲜销为主,由于鲜虾体内的含水率较高,在运输、加工和贮藏等环节易发生腐败和黑变,使产品的商品价值下降^[2],因此,收获后必须立即进行保鲜或加工。干制是其主要的加工方式,可以降低对虾的含水率,延长保质期。目前,常用的干燥方法有真空冷冻干燥(VFD)^[3]、微波干燥(MWD)^[4]和热风干燥(HAD)^[5]等。真空冷冻干燥是在真空和低

温环境下进行,可有效维持干制品外观形态及物质结构,营养成分及风味物质损失量小,然而存在着设备投入高,运行成本高的问题^[6]。微波干燥过程不易控制,容易导致干燥不充分或干燥过度。热风干燥是当前农产品干制加工的主要方式,由于操作方便,成本低,且对环境、场地和设备等要求不高,因此被广泛应用。然而,热风干燥的时间较长,容易造成脂肪氧化、美拉德褐变,出现不良气味,破坏制品的组织结构,热敏性物质容易被破坏,进而降低产品品质。此外,热风干燥因热量传递的方向与水分扩散的方向相反,对物料内水分的蒸发不利。

相对于传统热风干燥,中短波红外干燥(MSWID)能够显著缩短干燥时间,改善产品品质。MSWID是使用 $0.75 \sim 4 \mu\text{m}$ 范围的电磁波,其特点在于辐射频率和能量较高,引起分子之间转动能级和振动能级跃迁,热能损失较少,加热效率较高,同时因以电磁波形式传递,不需要任何媒介,既节能又环保,且干燥较均匀,品质良好。MSWID已成功应用于猕猴桃^[7]、桑葚^[8]、番木瓜^[9]、海鲜菇^[10]、南瓜片^[11]、白玉菇^[12]等农产品。然而,将

收稿日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32202102);
辽宁省博士科研启动基金计划项目(2022-BS-303)

第一作者: 林雅文,女,博士,讲师

通信作者: 李学鹏 E-mail: xuepengli8234@163.com

MSWID 应用于水产品干燥的报道比较少。

本文以南美白对虾为对象,研究其中短波红外干燥特性及色泽、质构、虾青素含量以及微观组织结构等的变化,建立薄层干燥模型,以获得较优的南美白对虾干燥加工条件,为提高南美白对虾干制品品质,预测和控制干燥过程提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

南美白对虾购于锦州当地水产市场,于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷冻储藏。

$\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 NaH_2PO_4 , 上海凇恩科技发展有限公司;Gluta 固定液(电镜专用,2.5%),北京索莱宝科技有限公司;无水乙醇,烟台市双双化工有限公司。以上试剂均为分析纯级。

1.2 设备与仪器

2100620 型中短波红外干燥箱,苏州高鹏自动化设备有限公司;XHF-DY 高速分散器,宁波新芝生物科技股份有限公司;Biofuge Stratos 型冷冻高速离心机,德国贺利氏公司;FX101-0 型电热鼓风干燥箱,上海树立仪器仪表有限公司;THZ-D 台式恒温振荡器,太仓市实验设备厂;FBS-750A 快速水分测定仪,厦门市弗布斯检测设备有限公司;HD-5 型智能水分活度测量仪,无锡市华科仪器仪表有限公司;CM-5 型分光测色仪,日本柯尼卡美能达公司;ILC-S 型质构仪,美国 Food Technology corporation;L5S 型紫外-可见分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;JSM-IT200 型扫描电子显微镜,日本电子株式会社;SBC-12 型小型离子溅射仪,北京中科科仪股份有限公司;JCS-31002C 电子天平,上海然浩电子有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 预处理方法 选择外观形态完整、大小均一[质量(14.05 ± 1.65)g, 身长(13.56 ± 0.2)cm]的南美白对虾,清洗干净,按每两只虾加 500 mL 清水的配比,开水入锅煮沸 2 min。煮熟后,用吸水纸将虾体表面的水分吸出。

1.3.2 中短波干燥 参数设定:温度 50,60,70 $^{\circ}\text{C}$,功率 1 920 W,辐射距离 10 cm。对南美白对虾进行干燥,以热风干燥为对 照 样。前 期 每 隔 1 h 称 重 1 次(精确至 0.01 g),计算水分含量。干燥后期

每隔 1 h 或 2 h 称重 1 次,直至湿基含水率 $\leq 10\%$,即干燥终点。重复 3 次,取平均值。

1.3.3 热风干燥 将熟化的南美白对虾放入热风干燥箱中,设定温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 进行干燥。称重方法与中短波红外干燥过程一致,直至湿基含水率 $\leq 10\%$,即干燥终点。重复 3 次,取平均值。

1.3.4 水分的测定 参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。

1.3.5 水分活度的测定 参考 GB5009.238-2016《食品安全国家标准 食品水分活度的测定》,使用经饱和 NaCl 校正过的水分活度仪测定,样品切碎后平放在测试盒的底部,置测定室中,用仪器扫描样品测定,待稳定读数即可。重复 3 次,取平均值。

1.3.6 干燥特性的测定

1) 干燥参数 用电子天平称重,水分含量计算公式^[13]:

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

式中: M_t ——南美白对虾在 t 时刻的水分含量, g/g; m_t —— t 时刻的南美白对虾质量, g; m_d ——干燥处理至恒重时样品绝干质量, g。

水分比(MR)计算公式^[13]:

$$\text{MR} = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

式中: M_0 ——南美白对虾的初始含水率, g/g。

干燥速率(drying rate, DR)计算公式^[13]:

$$\text{DR} = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中:DR——干燥速率; M_{t_1} —— t_1 时刻的水分含量(g/g); M_{t_2} —— t_2 时刻的水分含量, g/g; $t_2 - t_1$ ——干燥时间, min。

2) 有效水分扩散系数及活化能 有效水分扩散系数(D_{eff})^[11]描述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。菲克第二定律可用于描述降速干燥过程中水分的扩散。为消除物料几何形状的影响,作出如下假设:物料表面自由水含量为 0;水分均匀分布;样品的收缩可忽略;传热非常快,即忽略内部和外部的传热效应。 D_{eff} 计算公式:

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

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

将公式(4)两边取对数得公式(5)。

$$\ln \text{MR} = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2}\right)t \quad (5)$$

从 $\ln \text{MR}$ 与 t 的关系图中，获得斜率为 k 的直线，通过公式(6)计算得到 D_{eff} 。

$$k = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} \quad (6)$$

D_{eff} 和温度 (T) 的关系可用阿伦尼乌斯公式(7)来表示。

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (7)$$

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

将公式(7)两边取对数得公式(8)：

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad (8)$$

根据公式(8)将 D_{eff} 的自然对数与绝对温度的倒数作图，得到 E_a 。

1.3.7 干燥模型拟合 采用 5 个常用典型的薄层干燥数学模型(表 1)对干燥数据进行拟合，通过拟合优度 (R^2)、卡方值 (χ^2) 和标准误差 ($RMSE$) 对模型进行评价。具有较高 R^2 值和较低 χ^2 和 $RMSE$ 值的模型被认为是较好的模型。 R^2 、 χ^2 和 $RMSE$ 的计算如公式(9)–(11)^[14–15]所示。

表 1 5 个常用典型的薄层干燥数学模型

Table 1 Five common typical thin layer mathematical models

模型序号	模型名称	模型方程
1	Page	$\text{MR} = \exp(-kt^n)^{1/3}$
2	Newton	$\text{MR} = \exp(-kt)^{1/3}$
3	Wang and Singh	$\text{MR} = 1 + at + bt^{2/3}$
4	Dincer	$\text{MR} = G \exp(-St)^{1/4}$
5	Weibull	$\text{MR} = \exp^{-(\alpha t)^\beta}$ ^[15]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{pre},i} - \text{MR}_{\text{exp},i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{\text{MR}}_{\text{pre},i} - \text{MR}_{\text{exp},i})^2} \quad (9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2}{N-n} \quad (10)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{MR}_{\text{exp},i} - \text{MR}_{\text{pre},i})^2}{N}} \quad (11)$$

式中， $\text{MR}_{\text{exp},i}$ ——试验水分比； $\text{MR}_{\text{pre},i}$ ——预测水分比； N ——观察次数； n ——模型中常数个数。

1.3.8 色泽的测定 根据王伟等^[16]的方法，取干燥的南美白对虾的第二、三腹节作为样品进行测定。将表面光滑的样品放在平板上，然后将 CM-5 型色度计的传感器放在样品表面，读取色泽参数 L^* 、 a^* 和 b^* 值，计算 ΔE 值。在测量前，使用包装盒中的校准套件对仪器进行校准。其中， L^* 表示亮度， a^* 表示红绿值， b^* 表示黄蓝值。 ΔE 值表示总体色差，计算公式：

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (12)$$

式中， L_0^* 、 a_0^* 和 b_0^* ——熟化后干燥前样品的色泽参数值； L^* 、 a^* 和 b^* ——干燥后样品的色泽参数值。

1.3.9 质构的测定 采用王伟等^[16]的方法并稍作修改。使用 P60 柱状探针，随机抽取南美白对虾干样品。测试条件：测试前、测试中和测试后的速度均为 1 mm/s，测试距离为 5 mm，重复进行 3 次。将熟化的南美白对虾作为对照组，记录数据。

1.3.10 虾青素的测定 根据张旭飞等^[17]的方法并略微修改。取 2 g 样品，放入 50 mL 离心管中，加入乙醇，质量(g)/体积(mL)比 1.7，以 5 r/min 的速度旋转，均质时间 1 min。将其混匀后在水浴摇床中 40 $^{\circ}\text{C}$ 混合提取 2 h，4 $^{\circ}\text{C}$ 8 000 r/min 转速离心 5 min，收集上清液。重复上述操作。将沉淀提取 3 次，直到无色，最后合并 3 次提取的上清液。使用紫外-可见分光光度计在波长 474 nm 处测定水不溶性化合物的吸收光谱，根据谈佳玉^[18]的标准曲线计算虾青素含量。

1.3.11 微观结构观察 对 Jones 等^[19]的方法稍作修改。将南美白对虾腹部第 2 节切下，切成薄片 (5 mm×5 mm×1 mm)，在磷酸盐缓冲液 (phosphate buffered solution PBS, 0.1 mol/L, pH 7.2) 中清洗 5 min，重复 4 次；在体积分数 2.5% 的戊二醛溶液中浸泡 5 h，在 PBS 缓冲液中洗涤 10 min，重复 4 次。用不同体积分数 (50%、60%、70%、80%、90%、95% 和 100%) 的乙醇溶液冲洗 15 min，然后在干燥器中过夜，使肌肉脱水。用扫描电子显微镜观察样品

并拍照(500×)。

1.3.12 数据处理与分析 采用 SPSS 25 对数据进行显著性分析,显著水平为 5%。图表使用 Origin 2022 和 Microsoft Excel 2016 软件绘制,试验数据均以平均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。

2 结果分析

2.1 干燥条件对南美白对虾干燥特性的影响

不同干燥方法和温度对南美白对虾干燥特性和干燥速率曲线的影响分别见图 1 和图 2。由图 1 可知,50,60,70 °C 中短波红外干燥南美白对虾的时间分别为 16,12 h 和 7 h 40 min,表明干燥温度

越低,后期干燥越困难。60 °C 热风干燥条件下达到干燥的最终含水率 10% 湿基(w.b.)所用时间为 14 h,而相同温度(60 °C)下中短波红外干燥达到干燥的最终含水率 10%湿基(w.b.)的时间为 12 h,相比于热风干燥,干燥时间缩短 14.3%,表明中短波红外干燥可有效提高干燥速率。一般情况下,食品干燥过程发生在降速期。干燥速率曲线与水分含量有关^[20]。由图 2 可知,不同干燥条件下,随着南美白对虾样品中水分含量的降低,干燥速率降低,原因可能是对虾表面水分蒸发,表面逐渐变硬,水分扩散到表面的速率低于表面水分蒸发速率,使干燥速率有所下降^[21]。在中短波红外干燥过

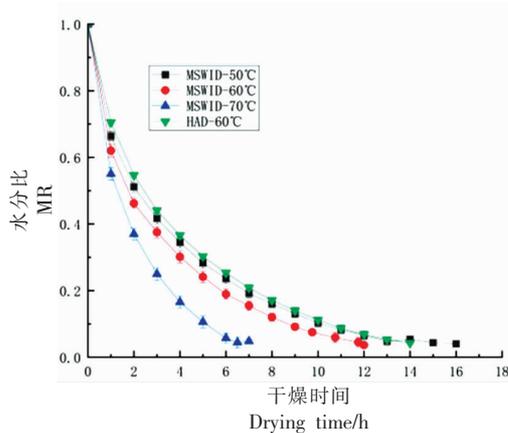


图 1 不同干燥条件下南美白对虾干燥特性曲线
Fig.1 Drying curves of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

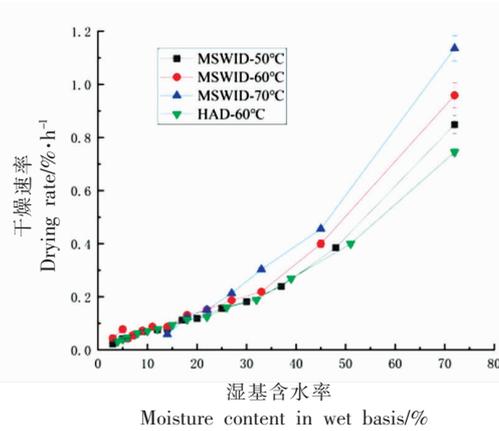


图 2 不同干燥条件下南美白对虾干燥速率曲线
Fig.2 Drying rate of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

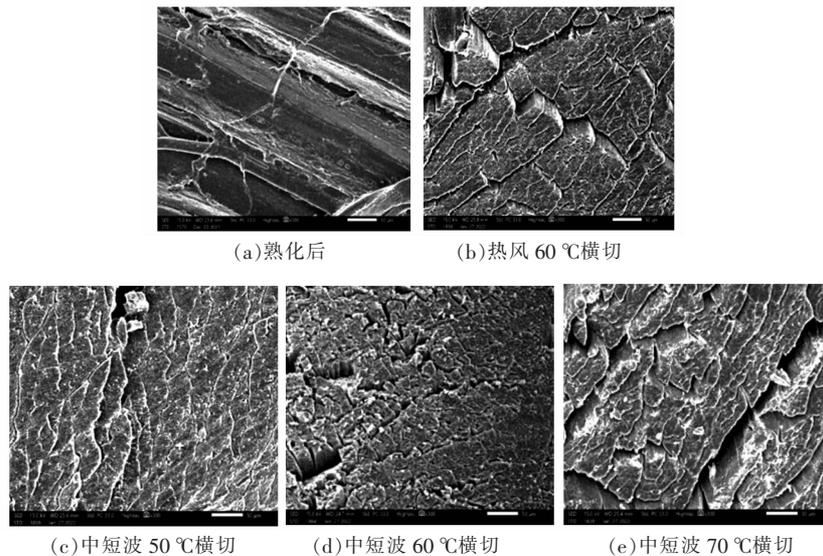


图 3 干燥方式对南美白对虾微观组织结构的影响

Fig.3 Effect of drying methods on the microstructure of *Penaeus vannamei*

程中,温度升高,水分比下降速率加快。结合干燥前、后南美白对虾微观结构(图 3)发现,熟化后南美白对虾肌纤维束间排列有序且致密,孔隙结构较小,干燥后肌纤维结构完整性下降,孔隙变大,致密结构被破坏^[22]。比较 4 种干燥条件发现,50℃中短波红外干燥的样品肌纤维保持较为完整,有轻微断裂,随着干燥温度的升高(60℃)肌纤维较为紧密,出现较多孔隙,干燥速率较 50℃更快^[23]。中短波红外 70℃干燥的样品,肌束间缝隙最大,此温度下的干燥速率最高^[24],干燥时间最短,然而,肌纤维破坏较严重,因此 60℃为较优的南美

白对虾中短波红外干燥温度。

2.1.1 干燥条件南美白对虾有效水分扩散系数的影响 表 2 为两种干燥方法的不同干燥温度对南美白对虾 D_{eff} 的影响。对于中短波红外干燥, D_{eff} 值在 50, 60, 70℃ 温度下分别为 2.2715×10^{-9} , 2.8929×10^{-9} 和 5.0364×10^{-9} 。温度越高, D_{eff} 越大。这可能由于温度升高会增加水分子的活性,使 D_{eff} 增大^[25]。60℃时,中短波红外干燥的南美白对虾的 D_{eff} 高于热风干燥的,因为中短波红外辐射可加速南美白对虾内部水分蒸发^[26],这也佐证了前述中短波红外干燥速率比热风干燥速率高的结论。

表 2 不同干燥条件下南美白对虾的有效扩散系数

Table 2 Effective diffusion coefficient of different drying conditions of *Penaeus vannamei*

T/℃	斜率 k	R^2	有效水分扩散系数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
MSWID-50	-5.5991×10^{-5}	0.9864	2.2715×10^{-9}
MSWID-60	-7.1307×10^{-5}	0.9895	2.8929×10^{-9}
MSWID-70	-1.2591×10^{-4}	0.9711	5.0364×10^{-9}
HAD-60	-5.8011×10^{-5}	0.9923	2.3535×10^{-9}

2.1.2 干燥条件对南美白对虾活化能的影响 活化能与水分含量呈反比, E_a 越大,干燥难度越大。农产品的 E_a 值通常在 12~110 kJ/mol^[11]。经计算,中短波红外干燥的 E_a 值为 36.4332 kJ/mol,即去除南美白对虾中 1 mol 水分所需的最小能量为 36.4332 kJ,略低于员冬玲等^[13]测定的南美白对虾过热蒸汽干燥的 E_a (39.63 kJ/mol),说明中短波红外干燥比过热蒸汽干燥较易失水。

2.1.3 干燥模型的确定 一般来说, R^2 值越接近 1, χ^2 值及 RMSE 越小,说明模型拟合程度越高。从表 3 可看出,Page 和 Weibull 模型的 R^2 较高, χ^2 和 RMSE 较小,表明相比于其它 3 种模型,Page 和 Weibull 模型可较好地预测不同干燥条件下南美白对虾干燥过程。在 Weibull 模型中, α 和 β 分别表示尺度参数和形状参数,分别代表物料在干燥过程中去除 63% 水分所需时间以及与干燥速率和水分迁移机理有关;形状参数 β 在 0.76~0.86 范围,表示干燥过程受内部水分扩散控制的降速干燥,与本研究干燥速率曲线一致。由于 Weibull 模型参数具有特殊的物理意义,因此选择 Weibull 模型作为南美白对虾干燥过程的预测模型。有研究表明,Weibull 模型也能较好地拟合超声波渗透

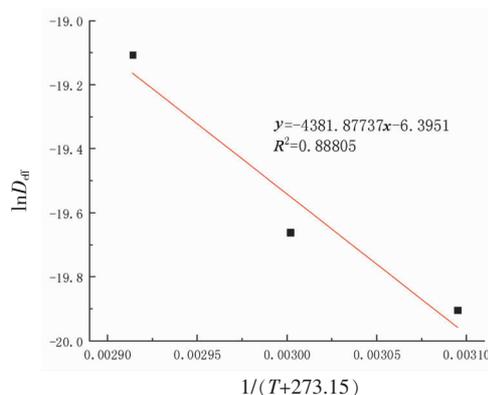


图 4 中短波红外干燥过程中 $\ln D_{\text{eff}}$ 与绝对温度倒数关系图

Fig.4 Relationship between $\ln D_{\text{eff}}$ and inverse of absolute temperature during MSWID

罗非鱼的真空微波干燥过程^[16]。

2.2 干燥条件对南美白对虾水分活度和色泽的影响

不同干燥条件对南美白对虾水分活度和色泽的影响见表 4。绝大多数新鲜收获水产品的 A_w 值都大于 0.99,极易导致微生物生长。干制品一般要求 $A_w < 0.69$,更利于储存^[27]。 $A_w < 0.65$ 时,大多数微生物可得到抑制。由表 4 可知,50℃中短波红外干燥和 60℃热风干燥的样品之间无显著性差异 ($P >$

表3 不同干燥条件下数学模型参数值

Table 3 Parameter values of mathematical models under different drying conditions

模型序号	T/°C	R ²	χ ²	RMSE	模型系数
1	MSWID-50	0.9984	1.5245×10 ⁻²	1.0497×10 ⁻²	k=0.3839 n=0.7620
	MSWID-60	0.9977	1.7788×10 ⁻²	1.2728×10 ⁻²	k=0.4497 n=0.7416
	MSWID-70	0.9986	1.0957×10 ⁻²	1.0901×10 ⁻²	k=0.5661 n=0.8586
	HAD-60	0.9986	1.3664×10 ⁻²	1.0094×10 ⁻²	k=0.3342 n=0.8107
2	MSWID-50	0.9882	1.9571×10 ⁻¹	4.0437×10 ⁻²	k=0.2624
	MSWID-60	0.9842	1.3463×10 ⁻¹	4.5204×10 ⁻²	k=0.3115
	MSWID-70	0.9954	3.2572×10 ⁻²	2.2904×10 ⁻²	k=0.4886
	HAD-60	0.9920	606561×10 ⁻²	3.3427×10 ⁻²	k=0.2455
3	MSWID-50	0.9852	8.5449×10 ⁻²	3.2702×10 ⁻²	G=0.9197 S=0.2394
	MSWID-60	0.9808	6.5888×10 ⁻²	3.8147×10 ⁻²	G=0.9248 S=0.2860
	MSWID-70	0.9950	2.3358×10 ⁻²	2.1215×10 ⁻²	G=0.9733 S=0.4761
	HAD-60	0.9903	2.9771×10 ⁻²	2.6876×10 ⁻²	G=0.9383 S=0.2293
4	MSWID-50	0.9428	1.4707	8.6687×10 ⁻²	a=-0.1692 b=0.0072
	MSWID-60	0.9418	4.3291×10 ⁻¹	8.3190×10 ⁻²	a=-0.2147 b=0.0120
	MSWID-70	0.9687	3.3870×10 ⁻¹	6.0367×10 ⁻²	a=-0.3301 b=0.0277
	HAD-60	0.9607	0.3407	6.9522×10 ⁻²	a=-0.1750 b=0.0080
5	MSWID-50	0.9983	1.5245×10 ⁻²	1.0497×10 ⁻²	α=3.5135 β=0.7620
	MSWID-60	0.9977	1.7788×10 ⁻²	1.2728×10 ⁻²	α=2.9374 β=0.7416
	MSWID-70	0.9986	1.0957×10 ⁻²	1.0901×10 ⁻²	α=1.9400 β=0.8586
	HAD-60	0.9986	1.3664×10 ⁻²	1.0094×10 ⁻²	α=3.8625 β=0.8107

0.05)。中短波红外 60 °C 和 70 °C 干燥的样品间也无显著性差异 ($P>0.05$), 且水分活度值都小于 0.65。通常在较低的水分活度状态下, 微生物活性和食品内酶反应活性也相对较低, 对比 4 种干燥条件下的 A_w 值, 中短波红外 60 °C 干燥样品的 A_w 值最低, 利于保藏, 最终选择 60 °C 中短波红外干燥南美白对虾。

色泽是衡量海产品品质的一个主要因素, 色泽变化直接关系其感官品质。干燥条件是影响物

料色泽变化的原因之一。由表 4 可知, 当干燥温度 50 °C 时, 中短波红外干燥前、后, 南美白对虾的 L^* 值差异不显著 ($P>0.05$), 中短波红外 60 °C 和 70 °C 干燥以及 60 °C 热风干燥时, 南美白对虾的 L^* 降低; 且干燥后 a^* 和 b^* 值均显著下降, 与熟化后相比差异显著 ($P<0.05$), 可能是因为发生美拉德褐变反应和油脂的氧化降解形成更多的棕色产物, 增加了色素浓度并使南美白对虾干制品颜色加深^[28]。

表4 不同干燥条件南美白对虾的色泽和水分活度

Table 4 Color and water activity of *Penaeus vannamei* under different drying conditions

干燥条件	L*	a*	b*	ΔE	A _w
MSWID-50 °C	57.1500 ± 0.7495 ^a	16.7450 ± 1.8031 ^c	22.4000 ± 0.3818 ^b	10.5991 ± 1.4502 ^a	0.6343 ± 0.0221 ^a
MSWID-60 °C	54.5367 ± 0.9802 ^{ab}	20.1567 ± 0.7379 ^{bc}	22.9533 ± 2.7635 ^{ab}	7.8870 ± 1.6468 ^b	0.5267 ± 0.0058 ^b
MSWID-70 °C	51.9800 ± 1.3860 ^{bc}	17.9200 ± 2.0180 ^c	21.6667 ± 0.7349 ^b	11.0607 ± 1.1804 ^a	0.5600 ± 0.0530 ^b
HAD-60 °C	49.6067 ± 0.9157 ^c	23.4367 ± 1.9905 ^{ab}	25.3400 ± 1.6284 ^{ab}	7.9739 ± 0.1392 ^b	0.6200 ± 0.0000 ^a
熟化后	56.5200 ± 2.9541 ^a	26.0533 ± 2.8685 ^a	27.3367 ± 3.1424 ^a	/	/

注: 同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.3 干燥条件对南美白对虾质构特性的影响

质构特性也是影响虾干制品感官特性的重要因素之一。由表 5 可知,干燥条件对弹性的影响不显著($P>0.05$)。干燥后南美白对虾的硬度、咀嚼性和胶黏性显著提升($P<0.05$),这是因为干燥使水分含量减少,蛋白质的网络结构被破坏,从而导致肌肉硬度增加。同时硬度高的产品其胶黏性与咀

嚼性也高。咀嚼性适当增加有利于口感的提升。从微观结构图可看出,干燥增加了南美白对虾肌肉的收缩,改变了对虾质构特性,且随着温度的增加,肌肉纤维出现断裂,硬度下降。高瑞昌等^[29]报道鲢鱼肌肉硬度与水分含量成反比,与本试验结论一致。

表 5 不同干燥条件对南美白对虾质构特性的影响

Table 5 Effect of different drying conditions on the texture characteristic of *Penaeus vannamei*

干燥条件	硬度/N	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
MSWID-50 °C	57.7500 ± 1.3435 ^a	2.1250 ± 0.1484 ^a	20.0000 ± 2.9699 ^{ab}	42.7100 ± 9.1267 ^{ab}
MSWID-60 °C	46.9833 ± 2.4373 ^b	2.2067 ± 0.1172 ^a	16.6333 ± 1.7616 ^{ab}	33.2433 ± 6.7786 ^{ab}
MSWID-70 °C	42.4833 ± 5.0721 ^{bc}	2.3267 ± 0.2160 ^a	17.7333 ± 5.6580 ^{ab}	42.1567 ± 16.9419 ^{ab}
HAD-60 °C	35.5833 ± 2.9750 ^c	2.4067 ± 0.0404 ^a	21.7333 ± 1.8771 ^a	52.5767 ± 5.7425 ^a
熟化后	25.0667 ± 4.0427 ^d	2.1933 ± 0.0971 ^a	13.7667 ± 2.9143 ^b	30.1033 ± 6.0502 ^b

注:同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.4 干燥条件对南美白对虾虾青素含量的影响

虾青素具有强抗氧化活性,是维生素 C、 β -胡萝卜素、叶黄素和玉米黄素的几十倍甚至几百倍,属于类胡萝卜素的一种。由图 5 可知,熟化后样品的虾青素含量最高,为 77.4600 $\mu\text{g/g}$,热风干燥产品虾青素含量为 56.2900 $\mu\text{g/g}$;50,60 和 70 °C 中短波红外干燥条件下的虾青素含量分别为 36.4972, 42.0933 和 37.1433 $\mu\text{g/g}$,与未干燥样品相比差异显著($P<0.05$)。这是由于虾青素受热极易发生热降解,温度和时间是影响虾青素热降解的两个主要因素。Niamnuay 等^[30]报道在煮沸过程中蛋白质降解,导致胡萝卜素-蛋白质复合物释放虾青素,虾的颜色发生变化。干燥后,南美白对虾干制品 a^* 降低,可能是虾青素降解的结果。中短波 70 °C 产品的虾青素含量较少,可能是因为干燥温度过高,导致虾青素降解过多;50 °C 产品的虾青素含量较少,可能由于干燥时间过长,导致虾青素降解过多;中短波 60 °C 干燥产品的虾青素含量较多,可能是由于温度和时间都较为适中。另外,60 °C 热风干燥产品的虾青素含量高于中短波干燥产品,可能是辐射导致虾青素降解较多。

2.5 相关性分析结果

采用皮尔森双尾检验,对 4 种干燥条件处理下的南美白对虾样品的色泽、质构特性和虾青素

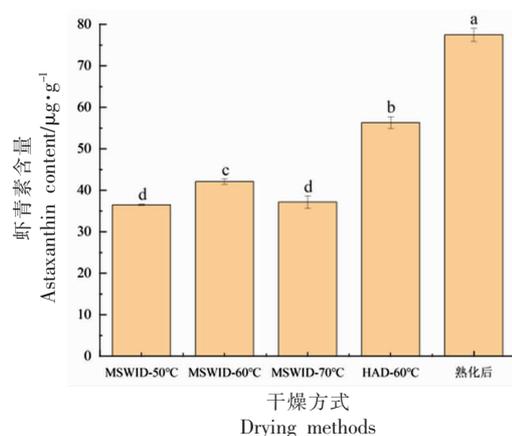


图 5 干燥方式对南美白对虾虾青素含量的影响

Fig.5 Effect of drying methods on the astaxanthin content of *Penaeus vannamei*

含量进行相关性分析,结果如图 6 所示。色泽参数之间存在相关关系, a^* 值与 L^* 值在统计学上显著负相关($P<0.05$), ΔE 与 a^* 值在统计学上极显著负相关($P<0.01$),与 b^* 值显著负相关($P<0.05$)。南美白对虾干燥后的质构特性与色泽变化有关,硬度与 L^* 值极显著正相关($P<0.01$),与 a^* 值显著负相关($P<0.05$)。此外,质构特性参数间也存在相关关系,咀嚼性与胶黏性呈极显著正相关($P<0.01$)。南美白对虾干燥后虾青素含量与色泽变化、质构特性相关,虾青素含量与 L^* 值显著负相关($P<0.05$),

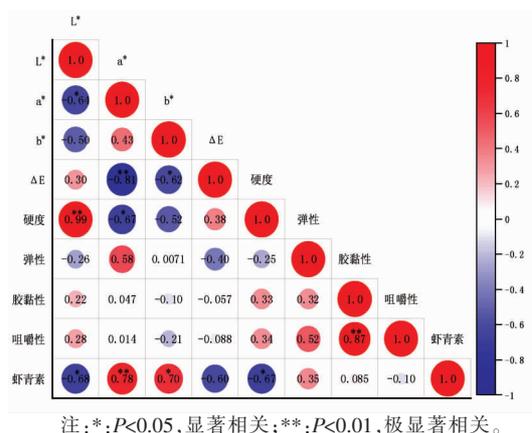


图6 不同干燥方式的南美白对虾色泽、质构及虾青素相关系数热图

Fig.6 Heat map of Pearson's correlation coefficient among color, texture characteristic and astaxanthin content of *Penaeus vannamei* under different drying methods

与 a^* 值极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 b^* 值显著正相关 ($P < 0.05$), 与硬度显著负相关 ($P < 0.05$)。这说明虾青素是影响对虾色泽的重要因素。Niamnuay 等^[21]也报道虾青素含量与对虾红色间存在较好的相关性。

3 结论

中短波红外干燥温度对南美白对虾的干燥时间影响显著, 温度越高, 达到湿基含水率 10% 以下所需时间越短, 干燥速率越大。与 60 °C 热风干燥的样品相比, 60 °C 中短波红外干燥的样品有效水分扩散系数较高 ($2.8929 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)。中短波红外干燥条件下, 温度越高, 有效水分扩散系数越高。南美白对虾中短波红外干燥的最优模型为 Weibull 模型, 各温度下的决定系数 R^2 均在 0.9977 以上, 可较好地预测其干燥过程。

中短波红外干燥条件下, 60 °C 得到的产品虾青素含量最高 ($42.0933 \mu\text{g}/\text{g}$)。相关性分析结果显示: 虾青素含量与 L^* 值和硬度显著负相关 ($P < 0.05$), 与 b^* 值显著正相关 ($P < 0.05$), 与 a^* 值极显著正相关 ($P < 0.01$)。60 °C 中短波红外干燥得到样品的 ΔE 与熟化后样品相差最小, 硬度较好, 弹性适中。

综上, 中短波红外干燥的干燥速率较高, 品质较好, 采用 60 °C 中短波红外干燥南美白对虾为宜。

参 考 文 献

- 董志俭, 王庆军, 孙丽平, 等. 热处理方式对南美白对虾虾青素含量、氨基酸组成及脂肪酸组成的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(23): 14-18, 28.
DONG Z J, WANG Q J, SUN L P, et al. Effect of heat treatment methods on the astaxanthin content, the amino acid composition and the fatty acid composition of *Penaeus vannamei* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(23): 14-18, 28.
- 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 X X. The effect of heating process on the quality of *Penaeus vannamei* and its shelf life during storage [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- 宣晓婷, 文丽华, 崔燕, 等. 真空冷冻干燥南美白对虾干燥模型及品质研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 79-84, 144.
XUAN X T, WEN L H, CUI Y, et al. Drying model and quality of *Litopenaeus vannamei* under vacuum freeze drying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 79-84, 144.
- 李文盛, 朱庆庆, 孙金才, 等. 不同干燥工艺对南美白对虾仁品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(5): 543-548.
LI W S, ZHU Q Q, SUN J C, et al. Effect of different drying methods on the quality of white shrimps [J]. Journal of Food Biology and Technology, 2016, 35(5): 543-548.
- 王雅娇, 马艳莉, 姚思远, 等. 南美白对虾热风干燥工艺及干燥模型的研究[J]. 食品工业, 2014, 35(10): 143-148.
WANG Y J, MA Y L, YAO S Y, et al. Hot-air drying process and models for *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Industry, 2014, 35(10): 143-148.
- 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 H S, JIAO S S, ZHANG Z T, et al. Research progress on drying technology and its effect on quality of aquatic product [J]. Food Industry, 2020, 41(9): 260-264.
- 曾目成, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 猕猴桃切片中短波

- 红外干燥特性及动力学模型[J]. 现代食品科技, 2014, 30(1): 153-159, 199.
- ZENG M C, BI J F, CHEN Q Q, et al. Drying characteristic and kinetics of kiwifruit slice under medium- and short-wave infrared radiation[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 153-159, 199.
- [8] 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 Q L, WANG Q W. Effects of short-and medium-wave infrared radiation drying on drying characteristics, nutritional quality and antioxidant activity of mulberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 39-45.
- [9] 高鹤, 易建勇, 毕金峰, 等. 番木瓜中短波红外干燥特性[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 30-35.
- GAO H, YI J Y, BI J F, et al. Drying characteristics of papaya with middle-and short-wave infrared radiation[J]. Food Science, 2015, 36(7): 30-35.
- [10] 陈建福, 汪少芸, 林梅西. 海鲜菇中短波红外干燥特性及动力学模型研究[J]. 化学工程, 2020, 48(10): 52-57.
- CHEN J F, WANG S Y, LIN M X. Middle and short infrared wave drying characteristics and kinetics model of *Hypsizygus marmoreus*[J]. Chemical Engineering, 2020, 48(10): 52-57.
- [11] 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 S H, LI H, JIE Z J. Analysis of pumpkin slice medium and short wave infrared drying characteristics and thin layer drying model [J]. Modern Food, 2021(13): 195-200.
- [12] 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 J F, WANG S Y, LIN M X. Drying characteristics and kinetics model of white *Hypsizygus marmoreus* with medium and short wave infrared radiation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(1): 46-53.
- [13] 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.
- YUAN D L, GENG W G, DU R, et al. Drying characteristics and modelling of *Penaeus vanamei* during superheated steam drying[J]. Food Science, 2020, 41(3): 62-67.
- [14] 巨浩羽, 赵海燕, 张菊, 等. 基于 Dincer 模型不同干燥方式下光皮木瓜干燥特性研究[J]. 中草药, 2020, 51(15): 3911-3921.
- JU H Y, ZHAO H Y, ZHANG J, et al. Drying characteristics of fritillaria by hot-wind based on Weibull function[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(15): 3911-3921.
- [15] 薛广, 李敏, 关志强. 基于 Weibull 函数的超声渗透罗非鱼片真空微波干燥模拟[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1): 157-165.
- XUE G, LI M, GUAN Z Q. Simulation of vacuum microwave drying of tilapia fillets by ultrasonic penetration based on Weibull function[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(1): 157-165.
- [16] 王伟, 柴春祥, 鲁晓翔, 等. 色差和质构评定南美白对虾的新鲜度[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(2): 271-277.
- WANG W, CHAI C X, LU X X, et al. Evaluation on freshness of *Penaeus vannamei* by color and texture[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 2015, 27(2): 271-277.
- [17] 张旭飞, 罗晓琳, 吉宏武, 等. 凡纳滨对虾水煮加热过程颜色与虾青素及体外抗氧化活性的相关性[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(3): 105-112.
- ZHANG X F, LUO X L, JI H W, et al. Correlation between astaxanthin coloration and in vitro antioxidant activity of *Litopenaeus vannamei* during boiling and heating[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41(3): 105-112.
- [18] 谈佳玉. 不同蒸煮方式对南极磷虾粉虾青素含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(1): 190-193.
- TAN J Y. Effects of different cooking methods on the content of astaxanthin from Antarctic krill powder[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 190-193.
- [19] JONES K W, MANDIGO R W. Effects of Chopping temperature on the microstructure of meat emulsions [J]. Journal of Food Science, 1982, 47(6): 1930-1935.
- [20] XU B G, WANG L, WEI B X, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate -wave infrared radiation drying [J].

- Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40(1): 619–628.
- [21] 高雪. 中短波红外联合热风干燥工艺对香菇干燥特性和品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
GAO X. Effects of drying characteristics and quality of shiitake mushrooms using mird combined HAD drying process[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [22] 牛玉宝, 姚雪东, 肖红伟, 等. 射频辅助热风干燥对红枣脆片质构特性和微观结构的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 296–306.
NIU Y B, YAO X D, XIAO H W, et al. Effects of radio frequency assisted hot air drying on the texture and microstructure of Jujube slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 296–306.
- [23] KHAWAS P, DASH K K, DAS A J, et al. Drying characteristics and assessment of physicochemical and microstructural properties of dried culinary banana slices[J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(5): 667–678.
- [24] WANG J, MUJUMDAR A S, DENG L Z, et al. High-humidity hot air impingement blanching alters texture, cell-wall polysaccharides, water status and distribution of seedless grape[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 194: 9–17.
- [25] XIAO H W, PANG C L, WANG L H, et al. Drying kinetics and quality of monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233–240.
- [26] CHEN Q Q, BI J F, WU X Y, et al. Drying kinetics and quality attributes of Jujube (*Zizyphus juba*, Miller) slices dried by hot-air and short-and medium-wave infrared radiation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759–766.
- [27] RUIZ-RAMÍREZ J, SERRA X, ARNAU J, et al. Profiles of water content, water activity and texture in crusted dry-cured loin and in non-crusted dry-cured loin[J]. Meat Science, 2005, 69(3): 519–525.
- [28] 李心悦, 孙剑锋, 崔晓朋. 红外干燥对即食虾仁品质的影响及品质评定模型的建立[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2980–2985.
LI X Y, SUN J F, CUI X P. Effect of infrared drying on the quality of instant shrimp and establishment of quality evaluation model[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(12): 2980–2985.
- [29] 高瑞昌, 袁丽, 刘伟民, 等. 热泵冷风干燥鲢鱼的挥发性盐基氮和脂质氧化品质模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 227–232.
GAO R C, YUAN L, LIU W M, et al. Modeling of total volatile basic nitrogen and thiobarbituric acid of silver carp dried in cold-air dryer with heat pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 227–232.
- [30] NIAMNUY C, DEVAHASTIN S, SOPONRONNARIT S. Effects of process parameters on quality changes of shrimp during drying in a jet-spouted bed dryer [J]. Journal of Food Science, 2010, 72(9): 553–563.
- [31] NIAMNUY C, DEVAHASTIN S, SOPONRONNARIT S, et al. Kinetics of astaxanthin degradation and color changes of dried shrimp during storage [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4): 591–600.

Effect of Medium and Short-Wave Infrared Drying Temperature on Drying Characteristics, Astaxanthin Content and Microstructure of *Penaeus vannamei*

Lin Yawen¹, Li Aiqing¹, Tian Xinyi¹, Xie Yongkang², Li Jianrong¹, Li Xuepeng^{*}

¹College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning

²Research Center for Agricultural and Sideline Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002)

Abstract To explore a new drying method for *Penaeus vannamei* (*P. vannamei*), improve drying rate, and enhance the quality of dried products, medium and short-wave infrared drying (MSWID) technology was adopted and the temperature (50, 60, 70 °C) was analyzed for its effects on the drying characteristics, water activity, effective moisture diffusion coefficient (D_{eff}), drying activation energy (E_a), color, texture, astaxanthin content, and microstructure of *P. vannamei*. The

drying curve was fitted using five common drying models. Hot air drying (HAD) with temperature of 60 °C was considered as a control. The results showed that the drying time decreased and the drying rate accelerated with increasing drying temperature under MSWID. The fastest drying rate was observed at 70 °C using MSWID, but it resulted in severe disruption of the muscle fibers of *P.vannamei*. The drying time of MSWID was shortened by 2 hours compared with HAD at 60 °C. The total color difference (7.8870 ± 1.6468) between dried samples and cooked samples was lower, and the hardness [(46.9833 ± 2.4373) N] and spring [(2.2067 ± 0.1172) mm] of dried samples were better under MSWID at 60 °C than those of HAD at 60 °C. The fitness of drying kinetics model of *P.vannamei* showed that the Weibull model ($R^2 > 0.9977$) could be used to describe and predict the MSWID process. D_{eff} of MSWID at 60 °C was 2.8929×10^{-9} m²/s, higher than that of HAD at 60 °C (2.3535×10^{-9} m²/s). Considering the drying efficiency and dried product quality of *P.vannamei*, it could be concluded that the drying temperature of MSWID at 60 °C was the optimal temperature with drying time of 12 h, E_a of 36.4332 kJ/mol and astaxanthin content of (42.0933 ± 0.66214) μg/g. This study could provide a theoretical basis and technology support for improving the drying process and quality of dried products of *P.vannamei*.

Keywords *Penaeus vannamei*; medium and short-wave infrared; drying characteristics; astaxanthin; microstructure