南极磷虾粉真空干燥特性及对其品质的影响

张帅帅^{1,2,3},郑尧^{2,3},郭全友^{2,3},杨柳^{1,2},李保国^{1*}

(1.上海理工大学 健康科学与工程学院,上海 200093; 2.中国水产科学研究院东海水产研究所 农业农村部远洋与极地渔业创新重点实验室,上海 200090; 3.崂山实验室,山东 青岛 266061)

摘要:目的探究南极磷虾粉的真空干燥特性及其营养品质变化规律。**方法**将磷虾原料在不同真空度 (0.04、0.06、0.08 MPa)及温度(75、85、95 ℃)下进行真空干燥。通过测定干基含水率、干燥速率及 水分扩散系数,研究其干燥特性。通过测定虾青素含量、TBA 和色差,探究其营养品质的差异。**结果**在75 ℃ 下,采用真空度0.06 MPa 和 0.08 MPa 相较于0.04 MPa,其干燥时间分别缩短了15%、21%。在不同真空干 燥条件下,磷虾有效水分扩散系数在(3.555 77~6.574 12)×10⁻¹⁰ m²/s 之间,Midilli 模型预测值与实验值之 间具有较高的拟合度(R^2 >0.999),能较准确地反映虾粉真空干燥过程。提高真空度可显著抑制虾青素 的分解及脂肪氧化,在75 ℃条件下,采用真空度0.06 MPa 和 0.08 MPa 相较于0.04 MPa,其虾青素含 量分别提高了21%、48%。在95 ℃条件下,采用真空度0.08 MPa 相较于0.04 MPa,其虾青素含 量分别提高了21%、48%。在95 ℃条件下,采用真空度0.08 MPa 相较于0.04 MPa,其TBA 值降低了 47%。 L^* 、 a^* 受到温度的影响更明显,在同一温度下 ΔE 随着真空度的上升而降低。**结论**在0.08 MPa、75 ℃ 下,通过真空干燥可以有效抑制虾粉中活性物质的降解,同时保证干燥速率,此研究为南极磷虾粉的真 空干燥工艺设计及生产控制提供了理论参考。

关键词: 南极磷虾粉; 真空干燥; 干燥特性; 营养品质 中图分类号: S986.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)05-0091-10 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.05.011

Vacuum Drying Characteristics and Their Effect on Quality of Antarctic Krill Meal

ZHANG Shuaishuai^{1,2,3}, ZHENG Yao^{2,3}, GUO Quanyou^{2,3}, YANG Liu^{1,2}, LI Baoguo^{1*}

(1. School of Healthy Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key Laboratory of Oceanic and Polar Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China; 3. Laoshan Laboratory, Shandong Qingdao 266061, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the drying characteristics of Antarctic krill meal and the variation of its nutritional quality. The krill raw materials were dried under different vacuum levels (0.04, 0.06 and 0.08 MPa) and temperature (75, 85 and 95 °C). The drying characteristics were assessed through moisture content (dry base), drying rate, and moisture diffusion coefficient, and the nutritional quality was evaluated by determination of astaxanthin, TBA and colour difference. At the drying temperature of 75 °C, the drying time at 0.06 MPa and 0.08 MPa was reduced by 15% and 21%, respectively, compared with the vacuum pressure of 0.04 MPa. The effective moisture diffusion coefficients of krill under different vacuum drying conditions ranged from (3.555 77 to 6.574 12)×10⁻¹⁰ m²/s. The Midilli model reflected the

收稿日期: 2023-09-12

基金项目:青岛海洋科技中心山东省专项经费(2022QNLM03002-3);中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD68) *通信作者

vacuum drying process of krill meal accurately, with a good fit between the predicted values and the experimental values $(R^2>0.999)$. Increasing the vacuum level significantly inhibited the decomposition and lipid oxidation of astaxanthin. At 75 °C, the astaxanthin content was increased by 21% and 48% at 0.06 MPa and 0.08 MPa, respectively, compared to 0.04 MPa. At 95 °C, the TBA value was reduced by 47% at 0.08 MPa compared to 0.04 MPa. L^* and a^* values were more markedly affected by drying temperature compared to b^* value, and ΔE value decreased with the increased vacuum pressure at the same drying temperature. In conclusion, the vacuum drying at 0.08 MPa and 75 °C can effectively reduce the degradation of the active substances in Antarctic krill meal and ensure the drying rate. This study can provide a theoretical reference for the design and production control of vacuum drying process with Antarctic krill meal. **KEY WORDS:** Antarctic krill meal; vacuum drying; drying characteristics; nutritional quality

南极磷虾(Euphausia superba)是海洋生物中储 备量较大的单种生物,其生物资源储量约为 6.5~10 亿 t^[1],它富含蛋白质、多不饱和脂肪酸和虾青素等 营养活性物质,是远洋渔业资源的重要构成部分。近 年来,我国在南极磷虾资源调查和捕捞技术方面快速 发展,2021 年我国的捕捞量约占全球总捕捞量的 25%^[2]。受到远洋捕捞和高活性内源酶的影响,南极 磷虾在捕捞后需及时进行船载加工,以降低其品质劣 变速率^[3]。目前,南极磷虾的船载加工品主要包括南 极磷虾粉、冻虾及少量虾油等。其中,虾粉作为磷虾 船载加工的重要产品之一,可直接用作动物饲料代替 鱼粉,或在陆基继续精深加工,以提取磷虾油、虾青 素和活性肽等高附加值产品^[4]。

虾粉船载加工工艺主要包括蒸煮、分离、干燥、 冷却和粉碎等,其中干燥是制备虾粉的关键步骤^[5], 决定着最终虾粉的品质。由于磷虾原料中的虾青素、 脂质和生育酚等在干燥过程中极易发生热降解,因此 严重影响了虾粉的营养品质和利用价值。宋艳艳等^[6] 在110、120、130、140、150℃下使用管束干燥机干 燥南极磷虾,在干燥结束时对应的脂肪含量分别减少 了约 28%、27%、28%、34%、35%,虾青素含量分 别减少了约16%、17%、24%、25%、25%。马田田^[7] 研究发现,当干燥温度在 55~85 ℃范围内时,每升 高 10 ℃,则虾青素含量下降 20.0 μg/g;在干燥温 度为 75~95 ℃时,每升高 10 ℃,则脂肪含量下降 1%。欧阳杰等^[8]研究表明,在105℃下干燥虾粉, 虾青素含量减少了 53%。虽然高温能够缩短干燥时 间,但会严重破坏脂肪、虾青素等热敏性物质。由 此可见,在保证干燥效率的同时,应尽可能减少虾 粉中热敏物质的损失,这是目前虾粉干燥亟须解决 的问题。

与传统的常压干燥相比,较低的压力可以降低水的沸点,提高干燥速率,降低干燥温度,减小物料干燥过程中的氧化作用,因而常用于富含热敏性物质原料的干燥。Šumic等^[9]研究了真空干燥过程中真空度和温度对酸樱桃中热敏性物质的影响,真空度的升高可有效抑制样品中总酚、花青素、维生素 C 的降解。研究表明,真空度和干燥温度会影响红醋栗中的热敏

性物质,真空度越高,则越有利于总酚、单体花青素等活性成分的保留^[10]。针对南极磷虾粉,利用真空干燥减少其虾青素等营养活性物质的降解少有报道。

文中设置 0.04、0.06、0.08 MPa 等 3 个真空度, 以及 75、85、95 ℃等 3 个温度,研究真空干燥虾粉 的干燥特性,以及对虾粉虾青素、硫代巴比妥酸 (TBA)值、色差的影响。旨在探究真空干燥关键参 数对南极磷虾粉干燥特性及营养品质的影响规律,为 生产高品质磷虾粉提供参考。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料: 南极磷虾, 于 2020 年 2 月捕捞, 2020 年 12 月运达实验室, 并于-80 ℃冰箱中贮藏, 磷虾体长为 30~45 mm, 中国水产有限公司, 捕捞船为"龙发"号。

主要试剂:全反式虾青素标准品(纯度 > 99%), 德国 Dr. Ehrenstorfer 公司;三氯乙酸、氯仿、EDTA (乙二胺四乙酸二钠)、硫代巴比妥酸(TBA),上海 麦克林生化科技有限公司;其他化学试剂,均为分析 级,上海国药化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备:HE53/02 水分测定仪,上海梅 特勒-托利多仪器有限公司;UV 9100D 紫外可见分 光光度计,北京莱伯泰科仪器股份有限公司; YZG/500 真空干燥机,常州市滇顺干燥设备有限公 司;CR-400 色彩色差仪,日本 Chroma Meter 公司。

1.3 方法

1.3.1 南极磷虾粉的干燥

南极磷虾粉的干燥采用真空干燥机进行,该干燥 机由可调节干燥温度的电加热器,能提供真空的真空 泵系统,以及干燥室等组成。在干燥时将托盘置于干 燥室内。

干燥过程如图 1 所示。取-80 ℃冰箱中贮存的南 极磷虾 800 g,经真空包装后在室温下(20~24 ℃) 流水解冻 2.5 h,然后采用蒸煮锅(100 ℃蒸汽)蒸制

· 92 ·



图 1 南极磷虾粉干燥过程 Fig.1 Drying process of Antarctic krill meal

10 min,再用料理机破碎 30 s,最后测定蒸煮后磷虾 的含水率为(74.89±0.4)%。将真空度设为 0.04、0.06、 0.08 MPa,将干燥温度设为 75、85、95 ℃,待温度 达到设定温度时再稳定 30 min后开始进行干燥实验。 将破碎后的样品约 400 g 放入不锈钢托盘上,铺料厚 度为 0.5 cm。每隔 20 min 取出称量,当磷虾的含水 率(以质量分数计)降至 10%时停止干燥,将样品粉 碎过筛(40 目),得到南极磷虾粉。

1.3.2 干基含水率和水分比

在干燥过程中,用电子天平称量南极磷虾的质量。通过式(1)计算干基含水率。

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \tag{1}$$

式中: M_t 为 t 时刻的干基含水率, g/g; m_t 为 t 时刻南极磷虾的质量, g; m_d 为干燥至恒定质量后干 物质的质量, g_o

南极磷虾的水分比(M_R)通过式(2)计算。

$$M_{\rm R} = \frac{M_t}{M_0} \tag{2}$$

式中: M_t 为时间t时的干基含水率,g/g; M_0 为 南极磷虾在干燥前的初始干基含水率,g/g。

1.3.3 干燥速率

干燥速率 R (g·g⁻¹·h⁻¹) 用式 (3) 计算。
R=
$$\frac{dM_t}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t}$$
 (3)

式中: $M_{t+\Delta t}$ 、 M_t 为 $t+\Delta t$ 、t时的干基含水率,g/g 通过干燥速率与时间的关系确定虾粉的干燥行为。

1.3.4 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数(D_{eff})描述了水分在速率下降期间从材料向周围的输送行为。水分传输到表面蒸发的主要机制为扩散,降速段的干燥特性可用菲克扩散定律方程来描述^[11]。假设初始水分分布均匀,有效水分扩散系数的计算如式(4)所示。

$$M_{\rm R} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{\rm eff} t}{4L_0^2}\right]$$
(4)

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数, m^2/s ; L_0 为铺 料厚度的一半,m;t为干燥时间,s;n为项数。

因为干燥持续时间较长,可将式(4)进一步简

化为仅有第 1 项的级数,并对等式两边取对数,见 式(5)。

$$\ln M_{\rm R} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\rm eff} t}{4L_0^2} \tag{5}$$

由式(5)可知,水分比的对数值与干燥时间 *t* 呈线性关系。

1.3.5 干燥模型拟合

选用 4 种常用的薄层干燥动力学模型对南极磷 虾粉真空干燥数据进行拟合,如表 1 所示。采用决 定系数 R^2 、卡方 χ^2 、均方根误差(RMSE)3 个参数 对模型拟合效果进行评价。 R^2 越大,则 χ^2 、RMSE 值越小,说明模型的拟合效果越好^[12],其计算见式 (6)~(8)。

表 1	4 种干燥动力学模型及其表达式	
Tab.1 Four dr	ving kinetic models and their expression	1

注: a、n、k、b均表示待定常数; t表示时间, min。

$$R^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\text{pre,i}}} - M_{R_{\text{exp,i}}})^{2}}{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{\text{exp,i}}} - M_{\overline{R}_{\text{exp}}})^{2}}$$
(6)

$$\chi^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (M_{R_{exp,i}} - M_{R_{pre,i}})^{2}}{N - Z}$$
(7)

$$R_{\rm MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (M_{\rm R_{pre,i}} - M_{\rm R_{exp,i}})^2}$$
(8)

式中: N、Z 为模型中数据的数量和常数的数量。 $M_{R_{expl}}$ 、 $M_{R_{pel}}$ 、 $M_{\bar{R}_{exp}}$ 分别为 t 时刻的实验水分比、 预测水分比和实验水分比的平均值。

1.3.6 虾青素含量测定

参考李念等^[13]的方法,称取试样 1~2 g(精确到 0.01 g)于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 丙酮,在 15 ℃ 以下超声波提取 15 min,在 8 000 r/min 下离心 5 min, 收集上清液于 50 mL 离心管中,在残渣中加入 20 mL 丙酮,重复以上过程,将合并提取液混匀。参考王书 妍等^[14]的方法,采用分光光度法测定虾青素的吸光 度,根据虾青素标准曲线计算其含量。

1.3.7 硫代巴比妥酸含量测定

参照郭全友等^[15]的方法并稍微修改,称取南极磷 虾粉 2 g(精确到 0.01 g),加入 50 mL 体积分数 为 7.5%的三氯乙酸溶液(其中含体积分数 0.1%的 EDTA),振荡 30 min 后静置,用双层滤纸过滤 2 次。 移取上清液 5 mL,加入 5 mL 0.02 mol/L 的 TBA 溶 液中,通过沸水浴 40 min,取出进行冰浴冷却 1 h。 取 5 mL 冷却后的液体,加入 5 mL 氯仿,并摇匀、 静置、分层,吸出上清液,分别于 532、600 nm 波长 处测定其吸光值,计算硫代巴比妥酸含量 K_{TBA} (mg/100 g),见式(9)。

$$K_{\text{TBA}} = \frac{(A_{532} - A_{600})}{155m} \times 72.6 \times 0.05 \times 100$$
(9)

式中: *A*₅₃₂ 为样品在 532 nm 处的吸光度; *A*₆₀₀ 为样品在 600 nm 处的吸光度; *m* 为样品质量。

1.3.8 色差测定

将干燥后的南极磷虾粉平铺于色差仪粉末测试 盒中,并压实,读取 L^* 、 a^* 、 b^* ,每个样品测定3次。 用 L^* (明度)、 a^* (红/绿度)和 b^* (黄/蓝度)表示虾 粉的颜色。干燥初始样品的颜色参数记为 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 。 样品在颜色上的差异用总色差(ΔE)表示,由式(10) 计算。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$
(10)

1.4 数据处理

重复测定 3 次,采用 SPSS 26 进行标准差计算和 Duncan 显著性分析,实验数据回归拟合分析采用 Origin 2022 软件,图表绘制采用 Origin 2022、 GraphPad prism 8。

2 结果与分析

2.1 真空度、温度对南极磷虾粉干燥特性的 影响

2.1.1 干基含水率和干燥速率

在干燥过程中南极磷虾粉的干基含水率、干燥 速率变化情况如图 2 所示。在同一温度下,随着真 空度的升高,南极磷虾粉干燥至终点的时间逐渐缩 短。在相同真空度下,通过提高干燥温度也会缩短 干燥时间,如图 2a1、b1、c1 所示。在 0.06、0.08 MPa 下与在 0.04 MPa 下相比, 在 75 ℃时干燥时间分别缩 短了 50、70 min 左右, 缩短了约 15%、21%; 在 85 ℃ 时干燥时间分别缩短了 30、40 min 左右, 缩短了约 13%、18%。其中, 0.06 MPa 与 0.08 MPa 相比, 其 干燥时间缩短幅度较小。在高温下,通过提高真空 度对干燥时间的影响较小。Devahastin 等^[16]研究发 现,在胡萝卜的干燥期间温度对干燥速率的影响大 于压力,特别是在较高的干燥温度下。在相同温度 下,真空度的增加降低了南极磷虾中所含水的沸点, 增大了传质动力,有利于物料中水分的蒸发,从而 缩短干燥时间[17]。



图 2 真空度和干燥温度对南极磷虾粉干燥曲线、干燥速率的影响 Fig.2 Effect of vacuum level and drying temperature on drying curve and drying rate of Antarctic krill meal

南极磷虾粉的真空干燥速率曲线如图 2a2、b2、 c2 所示。可以看出,南极磷虾的真空干燥可以分为 2 个干燥阶段。第1阶段从开始至干燥 40 min 时,为 快速干燥阶段,南极磷虾处于预加热状态,南极磷虾 的温度快速升高。同时,干燥速率升高,干基含水率 迅速下降^[18],在 40 min 时干燥速率最大。第2阶段 从 40 min 至干燥结束,称为降速干燥阶段,干燥速 率缓慢下降。这是因为在干燥过程中南极磷虾表面发 生了硬化,延缓了内部水分的蒸发。赵洪雷等^[19]在鲐 鱼的热风干燥过程中观察到,干燥速率曲线也分为2 个阶段。一般情况下,通过提高干燥温度和真空度可 以提高干燥速率、缩短干燥时间,但是过高的干燥温 度可能导致南极磷虾表面出现焦化现象,从而影响南 极磷虾内部水分的蒸发^[20]。

2.1.2 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数 D_{eff}是食品和其他材料干燥过 程研究和工程设计的重要参数,此参数与干燥温度、 水分含量有关^[21]。通过计算得到南极磷虾粉的有效水 分扩散系数(表 2),南极磷虾的有效水分扩散系数为 3.555 77×10⁻¹⁰~6.574 12×10⁻¹⁰ m²/s,根据 Panagiotou 等^[22] 的报道可知,水产品的干燥有效水分扩散系数一般为 $10^{-11}~10^{-9}$ m²/s。在文中研究的实验条件下, R^2 均大 于 0.91,表明拟合效果较好。在相同真空度下,有 效水分扩散系数随着温度的升高而增大,温度的升 高增加了南极磷虾水分子的动能,从而提高了水分 扩散速率^[11]。

表 2 不同干燥条件下南极磷虾粉的有效水分扩散系数 Tab.2 Effective moisture diffusion coefficient of Antarctic krill meal under different drying conditions

干燥条件	有效水分扩散系数 D _{eff} / (10 ⁻¹⁰ m ² ·s ⁻¹)	决定系 数 R ²
75 °C/0.04 MPa	3.657	0.987 65
75 °C/0.06 MPa	3.555	0.932 40
75 °C/0.08 MPa	4.200	0.962 30
85 °C/0.04 MPa	5.269	0.966 30
85 °C/0.06 MPa	6.047	0.959 71
85 °C/0.08 MPa	5.767	0.936 06
95 °C/0.04 MPa	5.649	0.951 23
95 °C/0.06 MPa	6.574	0.939 77
95 °C/0.08 MPa	6.466	0.918 36

2.1.3 南极磷虾粉真空干燥模型的建立与验证

食品薄层干燥数学模型的研究能够为优化干燥 工艺参数和降低干燥能耗等提供理论参考^[23]。将实验 中获得的数据应用于表 1 所示的 4 个薄层干燥模型 中,采用非线性回归分析对模型参数进行估计。4 个 数学模型的拟合结果和参数如表 3 所示,包括模型常 数(k,n,a,b)和模型评估参数(R^2 、RMSE 和 χ^2)。 从表 3 中可知,Midilli 模型具有较高的 R^2 ,以及最 低的 χ^2 、RMSE 值,且 $R^2 > 0.999$ 。其次是 Logistic、 Modifiye Page、Henderson ve Pabis 模型。具有 4 个常 数的 Midilli 模型大多被认为是最适合薄层干燥过程 的模型。Midilli 模型可用来描述南极磷虾粉真空干燥 过程中的水分比变化情况。

为了进一步检验 Midilli 模型预测南极磷虾粉真 空干燥过程的准确性,将干燥温度为 75、85、95 $^{\circ}$ 时的 $M_{\rm R}$ 预测值与试验值进行了比较,如图 3 所示。 各个数据点位于直线 y=x上,或在直线上下浮动,说 明 Midilli 模型的 $M_{\rm R}$ 预测值与试验值具有较高的拟合 度,能够较准确地描述南极磷虾粉真空干燥过程中 $M_{\rm R}$ 的变化规律。

2.2 真空度和温度对南极磷虾粉品质的影响

2.2.1 虾青素含量

在南极磷虾中,超过 95%的色素以虾青素的形式 存在^[24]。虾青素是热敏性物质,容易受热分解。由表4 可知, 虾粉虾青素含量(干质量)在 77.46~149.67 mg/kg 之间。在干燥过程中,真空度和温度对虾青素含量的影 响均较大。在 0.04 MPa 下,随着干燥温度的升高, 虾青素含量呈先降低后升高的趋势,这可能是因与 95、85 ℃相比,温度过高使得虾青素的分解程度更 高;75℃与85℃相比,其干燥时间虽然延长但温度更 低,则虾青素的分解程度更低。在高真空度 0.08 MPa 下,虾青素的含量均高于其他组。0.06 MPa 组虾青素 的含量高于 0.04 MPa 组,说明提高真空度可以保护虾 青素。在75℃下提高真空度,与0.04 MPa相比,其 虾青素保留率分别提高了21%、48%。各个实验组虾 青素含量最高的组为 75 ℃、0.08 MPa 组,其虾青素含 量达到(148.27±1.35)mg/kg。Niamnuy 等^[25]研究发现, 在真空下虾青素的降解率在所有储存温度下均低于在 空气下。这是由于虾青素在高温和氧气的作用下发生 了异构化和降解,氧化反应可能通过环氧化和羟基化 发生,通过直接氧化或脂肪酸氧化产生自由基的间接 作用来加速^[26]。Cong 等^[27]研究了干燥方式对南极磷 虾虾青素含量、结构及组成的影响,与二十碳五烯酸 (EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)相关的虾青素酯 更易被破坏,且单酯比二酯更易降解。通过提高干燥 真空度间接降低了磷虾与氧气的接触程度,延缓了虾 青素的降解。

2.2.2 TBA 含量

TBA 值主要指脂肪次级氧化产物丙二醛与硫代 巴比妥酸试剂反应后生成物的量,可准确反映脂肪 的氧化程度。如表 5 所示,磷虾粉的 TBA 值为 0.160~0.298 mg/100 g(干质量),相较于干燥前 (0.107 mg/100 g, 干质量)显著升高了 49%~178%。 南极磷虾的脂质主要有磷脂、甘油酯和游离脂肪酸 等,磷脂和不饱和脂肪酸在光、氧气、高温的作用下 易氧化,TBA 值在干燥后均得到升高。在同一温度 下,提高真空度会降低 TBA 值,温度越高,降低的 效果越明显。0.08 MPa组与 0.04 MPa组相比,在 95 ℃ 下其 TBA 值降低了 47%, 而在 85、75 ℃下 TBA 值 分别降低了19%、17%,通过提升真空度可减少高温 导致的脂质氧化。Aykın 等^[28]采用低温真空干燥鸡肉 片,结果表明,TBA 值随着真空度的减小而增加。 这是由于鸡肉切片在空气中暴露更剧烈,导致脂质次 级氧化程度加深。在 0.04 MPa 下,通过提高温度可 以升高其 TBA 值,高温促进了脂肪的氧化。

模型序号	温度/℃	真空度/MPa	k	n	a	b	R^2	χ ²	RMSE
	75	0.04	0.008 42	1.188 36			0.999 93	0.000 007	0.002 52
	75	0.06	0.007 35	1.414 01			0.997 00	0.000 337	0.017 08
	75	0.08	0.008 91	1.336 43			0.999 42	0.000 066	0.007 54
Modifiye Page	85	0.04	0.011 10	1.292 22			0.999 39	0.000 074	0.007 84
	85	0.06	0.012 12	1.359 20			0.998 91	0.000 140	0.010 69
	85	0.08	0.011 80	1.372 76			0.998 18	0.000 233	0.013 65
	95	0.04	0.011 54	1.346 39			0.998 15	0.000 233	0.013 80
	95	0.06	0.013 28	1.405 51			0.998 28	0.000 234	0.013 49
	95	0.08	0.012 81	1.447 67			0.995 75	0.000 575	0.021 15
	75	0.04	0.009 07	1.052 10			0.994 76	0.000 535	0.021 80
	75	0.06	0.008 12	1.082 92			0.973 81	0.002 941	0.050 49
	75	0.08	0.009 81	1.072 72			0.983 63	0.001 883	0.040 18
	85	0.04	0.012 08	1.058 35			0.986 69	0.001 596	0.036 47
Henderson	85	0.06	0.013 34	1.065 13			0.980 93	0.002 444	0.044 71
ve i abis	85	0.08	0.012 84	1.063 40			0.978 28	0.002 775	0.047 11
	95	0.04	0.012 66	1.065 65			0.980 96	0.002 389	0.044 21
	95	0.06	0.014 66	1.062 44			0.975 69	0.003 334	0.050 92
	95	0.08	0.014 02	1.066 87			0.968 70	0.004 238	0.057 41
	75	0.04	0.003 24	1.201 54	0.999 76	-0.000 02	0.999 96	0.000 005	0.001 92
	75	0.06	0.001 72	1.259 34	0.997 10	-0.000 35	0.999 62	0.000 051	0.006 13
	75	0.08	0.002 23	1.282 07	0.998 29	-0.000 14	0.999 85	0.000 022	0.003 92
	85	0.04	0.003 65	1.235 80	0.998 51	-0.000 14	0.999 85	0.000 022	0.003 87
Midilli	85	0.06	0.003 32	1.277 18	0.998 15	-0.000 21	0.999 74	0.000 043	0.005 22
	85	0.08	0.003 58	1.238 58	0.999 43	-0.000 43	0.999 97	0.000 005	0.001 69
	95	0.04	0.003 79	1.226 80	1.002 44	-0.000 32	0.999 47	0.000 086	0.007 39
	95	0.06	0.003 42	1.286 14	0.997 62	-0.000 42	0.999 80	0.000 038	0.004 61
	95	0.08	0.004 05	1.200 32	1.000 46	-0.001 03	0.999 95	0.000 009	0.002 28
	75	0.04	0.012 13		2.162 05	1.144 79	0.999 82	0.000 020	0.004 09
	75	0.06	0.014 94		0.328 50	1.315 80	0.998 33	0.000 203	0.012 74
Logistic	75	0.08	0.016 15		0.488 81	1.490 04	0.999 69	0.000 039	0.005 50
	85	0.04	0.019 03		0.585 08	1.583 26	0.999 68	0.000 043	0.005 68
	85	0.06	0.022 70		0.434 92	1.430 26	0.999 37	0.000 090	0.008 10
	85	0.08	0.022 59		0.404 16	1.397 44	0.998 86	0.000 167	0.010 81
	95	0.04	0.021 11		0.473 31	1.473 09	0.998 32	0.000 238	0.015 41
	95	0.06	0.026 45		0.354 62	1.346 45	0.999 13	0.000 138	0.009 59
	95	0.08	0.026 86		0.298 38	1.285 70	0.997 07	0.000 463	0.017 58

表 3 南极磷虾粉干燥数学模型拟合结果 Tab.3 Results of mathematical model fitting for Antarctic krill meal drving



图 3 南极磷虾粉真空干燥不同温度 Midilli 模型验证曲线 Fig.3 Verification curves of the Midilli model for vacuum drying of Antarctic krill meal at different temperature

表 4 真空度和温度对南极磷虾粉虾青素含量的影响 Tab.4 Effect of vacuum levels and temperature on astaxanthin content of Antarctic krill meal mg/kg

干燥		真空度/MPa	
温度/℃	0.04	0.06	0.08
75	$99.91{\pm}1.38^{Ca}$	$121.20{\pm}0.56^{Bb}$	148.27 ± 1.35^{Cc}
85	$78.70{\pm}1.56^{\rm Aa}$	$91.80{\pm}2.12^{\rm Ab}$	$143.62{\pm}2.09^{Bc}$
95	$85.64{\pm}1.77^{Ba}$	$93.45{\pm}1.40^{Ab}$	$134.94{\pm}1.53^{\rm Ac}$

注: 在相同真空度下,不同大写字母表示在不同干燥温度下该 指标差异显著(P<0.05);在相同温度下,不同小写字母 表示在不同真空度下该指标存在显著差异(P<0.05)。

2.2.3 色差

色泽是评价虾粉品质的重要感官标准之一。 L^* 不仅与虾粉的结构特性、水分含量和分布存在直接关 系,干燥降低了虾粉的水分含量,导致 L^* 发生变化。 由表6可知,当干燥温度从 75 ℃升至 85 ℃时,虾 粉的 L^* 显著增大(P<0.05);当温度升至 95 ℃时, L^* 表 5 真空度和温度对南极磷虾粉 TBA 含量的影响 Tab.5 Effect of vacuum levels and temperature on TBA content of Antarctic krill meal mg/100 g

干燥		真空度/MPa	
温度/℃	0.04	0.06	0.08
75	$0.196{\pm}0.003^{Aa}$	$0.160{\pm}0.005^{\mathrm{Ab}}$	$0.162{\pm}0.002^{ABb}$
85	$0.212{\pm}0.005^{Ba}$	$0.184{\pm}0.002^{Bb}$	$0.171{\pm}0.005^{Bc}$
95	$0.298{\pm}0.009^{Ca}$	$0.180{\pm}0.005^{Bb}$	$0.156{\pm}0.008^{\rm Ac}$

注:相同真空度下,不同大写字母表示不同干燥温度下,该指标差异显著(P<0.05)。在相同温度下,不同的小写字母表示不同真空度下,该指标有显著差异(P<0.05)。

明显下降(P<0.05),与干燥前相比 L*均降低,说明 干燥后样品的亮度降低,这与宋艳艳等^[6]的结论一 致。虾粉颜色的变化可能与干燥过程中美拉德反应形 成的深色色素有关。在同一真空度下,a*呈先降低后 升高的趋势。在同一温度下,通过改变真空度可以显 著影响虾粉的色泽。在同一温度下,各实验组之间 b* 无显著性差异,在同一真空度下,仅在 0.04 MPa下,

温度/℃	真空度/MPa	L^*	<i>a</i> *	b^{*}	ΔE
75	0.04	$60.01{\pm}0.23^{\mathrm{Ba}}$	$21.42{\pm}0.26^{Aa}$	$32.31{\pm}0.32^{Ab}$	$17.60{\pm}0.38^{Aa}$
	0.06	$60.37{\pm}0.41^{\rm Ba}$	$21.46{\pm}0.14^{\mathrm{Ba}}$	$31.55{\pm}0.28^{Aa}$	$16.95{\pm}0.24^{Aa}$
	0.08	$60.38{\pm}0.26^{Aa}$	$21.79{\pm}0.16^{\text{Ba}}$	$31.55{\pm}0.39^{Aa}$	$17.05{\pm}0.45^{\mathrm{Aa}}$
85	0.04	$60.90{\pm}0.30^{Ca}$	$21.20{\pm}0.30^{Ab}$	$32.12{\pm}0.70^{Aa}$	$17.49{\pm}0.70^{\rm Ab}$
	0.06	$61.97{\pm}0.35^{\rm Cb}$	$20.63{\pm}0.28^{\rm Aa}$	$31.30{\pm}0.22^{Aab}$	$16.8{\pm}0.29^{Aab}$
	0.08	$62.65{\pm}0.31^{Bc}$	$20.58{\pm}0.13^{Aa}$	$30.78{\pm}0.24^{\rm Aa}$	$16.48{\pm}0.23^{Aa}$
95	0.04	58.73±0.64 ^{Aa}	$21.77{\pm}0.45^{Aa}$	$32.80{\pm}0.68^{\rm Aa}$	$18.06{\pm}0.74^{Aa}$
	0.06	$59.61{\pm}0.11^{Aab}$	$21.68{\pm}0.24^{\text{Ba}}$	$32.14{\pm}0.80^{Aa}$	$17.46{\pm}0.82^{Aa}$
	0.08	$59.74{\pm}0.51^{Ab}$	$22.85{\pm}0.40^{\text{Cb}}$	$31.58{\pm}0.53^{Aa}$	$17.38{\pm}0.64^{Aa}$

表 6 真空度和温度对南极磷虾粉色泽的影响 Tab.6 Effect of vacuum level and temperature on the colour of Antarctic krill meal

注: 在相同真空度下,不同大写字母表示在不同干燥温度下该指标差异显著(P<0.05);在相同温度下,不同小写字母表示在不同真 空度下该指标存在显著差异(P<0.05)。 75 ℃与其他温度存在差异。由此可知,在实验中选择的真空度和温度对 b^{*}的影响不大。在同一温度下,通过提高真空度可以降低ΔE,高真空度在一定程度上可以保护虾粉色泽。

3 结语

对南极磷虾粉的真空干燥特性及品质变化进行 了研究,评估了真空度和温度对南极磷虾粉的干基含 水率和干燥速率的影响。通过将薄层干燥模型与实验 数据拟合,并进行了模型验证,选择 Midilli 模型描 述南极磷虾粉的真空干燥过程。有效水分扩散系数结 果表明,在所研究的温度范围内,通过提高干燥温度 可以有效升高水分扩散系数。色差结果显示,温度主 要影响虾粉的 *L**,真空度主要影响虾粉的 *a**;温度 和真空度均会影响虾粉的虾青素、TBA 值,高的真 空度有利于防止虾青素的氧化分解,降低 TBA 值。 从真空度和温度的作用结果来看,在 0.08 MPa、75 ℃ 条件下干燥南极磷虾,可以最大程度地降低虾青素降 解和脂肪氧化程度,同时保证一定的干燥速率。

参考文献:

- LI L Z, LU P, CHI H, et al. Sustainable Development of Antarctic Krill Environmental Resources Based on System Dynamics[J]. Ecological Chemistry and Engineering S, 2021, 28: 471-485.
- [2] CCAML R. Statistical Bulletin[EB/OL]. 2022. https:// www.ccamlr.org/en/document/data/ccamlr-statistical-bul letin-vol-34.
- [3] 刘小芳,刘建志,唐一新,等. 贮藏条件对南极磷虾 粉脂质氧化稳定性的影响[J]. 饲料工业, 2019, 40(4): 52-57.

LIU X F, LIU J Z, TANG Y X, et al. Effects of the Storage Conditions on the Lipid Oxidation Stability of Antarctic Krill (Euphausia Superba) Meal[J]. Feed Industry, 2019, 40(4): 52-57.

- [4] 杨柳, 王鲁民, 周国燕, 等. 南极磷虾粉的加工工艺、 品质特性与应用研究进展[J]. 海洋渔业, 2022, 44(4): 501-512.
 YANG L, WANG L M, ZHOU G Y, et al. Processing Technology, Quality Characteristics and Application Status of Antarctic Krill Powder[J]. Marine Fisheries, 2022, 44(4): 501-512.
- [5] 欧阳杰,赵昕源,马田田,等. 南极磷虾粉加工过程 中品质变化及评价研究进展[J]. 渔业现代化, 2022, 49(4): 1-7.
 OUYANG J, ZHAO X Y, MA T T, et al. Research Status and Prospects on Quality Change and Evaluation of An-

tarctic Krill Meal during Processing[J]. Fishery Modernization, 2022, 49(4): 1-7.

- [6] 宋艳艳,欧阳杰,沈建,等.管束干燥设备加工南极 磷虾品质分析[J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 67-73.
 SONG Y Y, OUYANG J, SHEN J, et al. Analysis of Quality of Antarctic Krill Processed by Tube Bundle Dryer[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(1): 67-73.
- [7] 马田田. 南极磷虾粉干燥工艺研究[D]. 上海: 上海海 洋大学, 2019: 34-44.
 MA T T. Study on Drying Technology of Antarctic Krill Powder[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 34-44.
- [8] 欧阳杰,赵昕源,马田田.南极磷虾粉加工过程中虾 青素的含量、结构及抗氧化性[J].水产学报,2022, 46(3): 420-429.
 OUYANG J, ZHAO X Y, MA T T. Astaxanthin Content, Structure and Antioxidant Activity in the Processing of Antarctic Krill (Euphausia Superba) Meal[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(3): 420-429.
- [9] ŠUMIĆ Z, TEPIĆ A, VIDOVIĆ S, et al. Optimization of Frozen Sour Cherries Vacuum Drying Process[J]. Food Chemistry, 2013, 136(1): 55-63.
- [10] ŠUMIĆ Z, VAKULA A, TEPIĆ A, et al. Modeling and Optimization of Red Currants Vacuum Drying Process by Response Surface Methodology (RSM)[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 465-475.
- [11] ARAL S, BEŞE A V. Convective Drying of Hawthorn Fruit (*Crataegus* SPP): Effect of Experimental Parameters on Drying Kinetics, Color, Shrinkage, and Rehydration Capacity[J]. Food Chemistry, 2016, 210: 577-584.
- [12] 吴靖娜,陈晓婷,刘智禹,等.海马真空冷冻干燥特 性及其动力学模型[J]. 渔业研究, 2019, 41(5): 404-408.
 WU J N, CHEN X T, LIU Z Y, et al. The Drying Characteristic and Dynamical Modeling of Seahorse under Vacuum Freeze Drying[J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(5): 404-408.
- [13] 李念,陈露珠,安鑫,等.3种虾壳中虾青素提取工艺 优化及其抗氧化活性比较[J].上海海洋大学学报, 2022,31(1):298-308.
 LI N, CHEN L Z, AN X, et al. Optimization of Extraction Process and Comparison of Antioxidant Activities of Astaxanthin from Three Kinds of Shrimp Shells[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 298-308.
- [14] 王书妍,曹旭鹏,孟迎迎,等.雨生红球藻中虾青素
 含量快速测定方法[J].中国油脂,2018,43(12):
 144-148.

WANG S Y, CAO X P, MENG Y Y, et al. A Rapid Determination Method for Astaxanthin Content in Haematococcus Pluvialis[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(12): 144-148.

[15] 郭全友,李松,李保国,等. 冻藏时间对养殖大黄鱼 体色和肌肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 99-107.
GUO Q Y, LI S, LI B G, et al. Effects of Frozen Storage

Time on Body Color and Muscle Quality of Cultured Pseudosciaena Crocea[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 99-107.

- [16] DEVAHASTIN S, SUVARNAKUTA P, SOPONRONNARIT S, et al. A Comparative Study of Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material[J]. Drying Technology, 2004, 22(8): 1845-1867.
- [17] TIAN Y T, WU S Z, ZHAO Y T, et al. Drying Characteristics and Processing Parameters for Microwave-Vacuum Drying of Kiwifruit (Actinidia Deliciosa) Slices[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2620-2629.
- [18] 张军文,郑晓伟,沈建,等. 南极磷虾干燥特性的研究[J]. 极地研究, 2018, 30(2): 186-191.
 ZHANG J W, ZHENG X W, SHEN J, et al. Study on Drying Characteristics of Antarctic Krill[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2018, 30(2): 186-191.
- [19] 赵洪雷,孟德飞,徐永霞,等. 鲐鱼热风干燥动力学及品质变化研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6):
 8-14.

ZHAO H L, MENG D F, XU Y X, et al. Study on Hot Air Drying Kinetics and Quality Changes of Scomber Japonicus[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 8-14.

[20] 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 Drying Models for Litopenaeus Vannamei[J]. The Food Industry, 2014, 35(10): 143-148.

- [21] JIANG M X, WU P, XING H H, et al. Water Migration and Diffusion Mechanism in the Wheat Drying[J]. Drying Technology, 2021, 39(6): 738-751.
- [22] PANAGIOTOU N M, KROKIDA M K, MAROULIS Z B, et al. Moisture Diffusivity: Literature Data Compilation for Foodstuffs[J]. International Journal of Food Properties, 2004, 7(2): 273-299.
- [23] 应巧玲,励建荣,傅玉颖,等. 食品薄层干燥技术的研究进展[J]. 中国粮油学报,2010,25(5):115-119.
 YING Q L, LI J R, FU Y Y, et al. Research Progress of Food Thin Layer Drying Technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(5): 115-119.
- [24] 于晓. 南极大磷虾(Euphausia Superba)虾青素制备与 理化性质的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013: 17-18.
 YU X. Study on Extraction and Physiochemicai Proper-

ties of Antarctic Krill (Euphausia Superba) Astaxanthin[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 17-18.

- [25] 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.
- [26] MARTÍNEZ-DELGADO A A, KHANDUAL S, VILLANUEVA-RODRÍGUEZ S J. Chemical Stability of Astaxanthin Integrated into a Food Matrix: Effects of Food Processing and Methods for Preservation[J]. Food Chemistry, 2017, 225: 23-30.
- [27] CONG X Y, MIAO J K, ZHANG H Z, et al. Effects of Drying Methods on the Content, Structural Isomers, and Composition of Astaxanthin in Antarctic Krill[J]. ACS Omega, 2019, 4(19): 17972-17980.
- [28] AYK1N-DINÇER E, ERBAŞ M. A Comparative Study of Cold Drying Conditions on the Physicochemical, Microbial and Sensory Properties of Dried Chicken Slices[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(3): 1979-1989.