



南极磷虾粉螺旋梯级干燥工艺优化及验证

欧阳杰^{1*}, 马靖松^{1,2}, 马田田¹, 黄天¹, 沈建¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092;

2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 为优化南极磷虾粉螺旋干燥工艺参数, 获得高质高效的南极磷虾粉干燥工艺, 实验采用螺旋干燥实验装置, 对南极磷虾梯级干燥工艺进行研究, 在单因素试验的基础上以 Box-Behnken 原理设计优化试验, 研究第一梯级干燥温度, 梯级干燥切换节点, 第二梯级干燥温度对干燥时间、脂肪和虾青素含量的影响。结果显示, 不同因素对干燥时间、虾青素含量影响顺序为第一梯级干燥温度 (A)>第二梯级干燥温度 (C)>梯级切换水分含量 (B), 对脂肪含量影响顺序为梯级切换水分含量 (B)>第一梯级干燥温度 (A)>第二梯级干燥温度 (C)。响应面得到较优的工艺参数为第一梯级干燥温度 105 °C、梯级切换水分含量 50%、第二梯级干燥温度 88 °C, 在此条件下, 干燥时间、脂肪和虾青素含量分别为 160 min、16.83%、159.32 μg/g, 螺旋梯级干燥下的南极磷虾粉品质优于恒温干燥。研究表明, 使用优化后的螺旋干燥工艺能在保障干燥效率的同时有效提高虾粉品质。本研究可为南极磷虾高品质生产和南极磷虾粉船载加工技术与关键设备的国产化研制提供技术参考。

关键词: 南极磷虾; 螺旋干燥; 干燥工艺; 品质

中图分类号: S 985; TS 254.3

文献标志码: A

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 隶属于磷虾目 (Euphausiacea) 磷虾科 (Euphausiidae), 生物储藏量巨大, 是世界上已知的最广泛的后生动物种群, 声学探测推测其生物量约为 3.79 亿 t, 被誉为人类最后的蛋白质来源^[1-2]。南极磷虾营养价值高且成分齐全, 含有丰富矿物质以及多种生物活性成分^[3], 是一种具有抗炎^[4]、抗氧化^[5]等功效的功能性食品, 蛋白质含量占其干重的 60%~65% 且富含 EPA 和 DHA 等不饱和脂肪酸等营养活性成分^[6-7], 对于促进人类的健康和增强动物的生长活性有着重要的作用^[8]。在食品和饲料领域, 南极磷虾展现出巨大的开发潜力, 是未来海洋资源利用的重要发展方向之一。

南极磷虾主要渔场远离陆地, 运输成本高昂, 其初始水分含量高达 80% 左右, 体内酶活体系活性较高, 捕捞后易自溶导致新鲜度快速下降, 须在捕捞后尽快加工^[9-10]。南极磷虾主要加工产品有南极磷虾粉、南极磷虾油、虾干、虾仁等多种产品, 其中南极磷虾粉是目前南极磷虾船载加工最主要的产品之一, 在捕捞加工船上快速、高质地鲜虾转化为虾粉, 是实现南极磷虾资源高效利用的关键环节^[11-12]。南极磷虾粉加工主要包括蒸煮、压榨、干燥、粉碎等工序^[13], 干燥是南极磷虾粉加工过程中涉及热处理时间最长的环节。赵昕源等^[14]研究发现, 在干燥过程中会造成虾青素等热敏性物质的大量损失, 南极磷虾经干燥处理

收稿日期: 2024-04-30 修回日期: 2024-05-21

资助项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2401200)

通信作者: 欧阳杰 (照片), 从事水产品加工技术与装备研究, E-mail: ouyangjie@fmri.ac.cn



后, 虾青素减少了 58.6 $\mu\text{g/g}$, 干燥是南极磷虾粉加工过程中营养成分损失最多的工序。

加工工艺与装备是制约虾粉加工产业发展的主要因素, 我国的虾粉加工在产品得率和品质方面与挪威等南极磷虾产业发达国家还存在着较大差距^[15]。目前我国虾粉加工中, 干燥常采用圆盘干燥设备, 其具有换热面积大、结构紧凑的特点, 但易造成堆料和干燥不均匀等问题^[16]。螺旋干燥兼具圆盘干燥的优点, 同时具有自主输送和减少物料堆积的优势, 研究发现螺旋干燥南极磷虾的干燥活化能为 15.64 kJ/mol, 有利于物料的干燥^[17]。温度对南极磷虾干燥过程的影响较大, 温度越高, 干燥所需时间越短, 但高温会加快南极磷虾营养成分和虾青素等活性物质的损失, 还可能导致干燥过程中产生焦糊、结块等问题; 低温干燥虽有助于品质的提升, 但会降低干燥效率, 增加能源消耗^[18-19]。梯级干燥工艺相比于恒温干燥工艺, 可兼顾干燥效率与能耗, 并能有效保障产品品质的稳定^[20]。目前已有学者针对南极磷虾梯度干燥进行研究, 马田田等^[21]利用热风干燥选择 5 种不同的梯度变温方式干燥南极磷虾, 发现相比于恒温干燥, 合适的变温干燥工艺更适合南极磷虾加工, 其中采用降温梯度干燥可同时实现降低南极磷虾营养损失, 提高干燥效率、降低能耗的目标。为了优化南极磷虾粉螺旋干燥工艺参数, 获得高质高效的南极磷虾粉干燥工艺, 本研究采取螺旋干燥技术, 对南极磷虾梯级降温干燥工艺进行优化, 以期得到高效优质的南极磷虾粉。在单因素试验的基础上运用 Box-Behnken 原理, 设计三因素三水平优化试验, 以第一梯级干燥温度、梯级切换水分含量、第二梯级干燥温度等为因素, 探究其对干燥时间、南极磷虾粉脂肪和虾青素含量的影响, 在保证南极磷虾粉品质的前提下提高干燥效率, 为南极磷虾粉生产提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

南极磷虾样品由中国水产有限公司“龙腾”号捕捞加工船于 2022 年 4 月在南极海域 (FAO 048 区) 捕捞, 2023 年 8 月冷链运输至实验室, $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷库中冷冻保存备用, 解冻后磷虾体长 45~75 mm, 个体完整、无损伤。实验过程中, 研究人员严格遵守实验动物伦理操作规范。

1.2 仪器与试剂

螺旋加热干燥机, 常州广博干燥设备有限公司; SS752 型三足式离心机, 张家港市乐余通沙轻工机械厂; HH-2 型智能蒸饭柜, 常州朗越仪器制造有限公司; XS105 型电子分析天平, 梅特勒-托利多国际贸易有限公司; NR110 型精密色差仪, 上海精密仪器有限公司; DZTW 型恒温加热套, 上海科恒实业发展有限公司; UV-2204PC 型紫外可见分光光度仪, 上海精密仪器有限公司; GTR16-2 型高速台式冷冻离心机, 北京时代北利离心机有限公司; DK-S22 型电热恒温水浴锅, 上海精宏实验设备有限公司; MA150C-000230V1 型快速水分测定仪, 赛多利斯中国有限公司; 34970A 型数据采集仪, 是德科技中国有限公司; 34307A K 型热电偶, 是德科技中国有限公司。

无水乙醇、石油醚均为分析纯, 国药集体化学试剂有限公司; 虾青素标准品, 上海源叶生物科技有限公司。

1.3 实验方法

工艺流程 南极磷虾→解冻→蒸煮→离心脱水→干燥→粉碎过筛。具体如下: 冷冻南极磷虾使用常温流水解冻, 水温 $15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 完全解冻后沥干表面水分。解冻后磷虾使用智能蒸饭柜在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下蒸汽蒸煮 10 min, 冷却至常温, 使用三足式离心机 ($1\ 500\ \text{r/min}$, 离心时间 3 min) 脱除部分水分后取出备用。取一定量经预处理后的南极磷虾置于螺旋加热干燥机中干燥, 南极磷虾水分含量使用快速水分测定仪测定, 降至 10% 后即判定为干燥终点。干燥后南极磷虾经粉碎后过 40 目筛, 待测。

单因素试验 采用单因素试验分析第一梯级干燥温度、梯级切换水分含量、第二梯级干燥温度对南极磷虾品质的影响。取一定量经预处理后的南极磷虾置于螺旋加热干燥机中干燥, 在堆料厚度 20 cm, 搅拌速率 6 r/min 的条件下进行试验。以干燥时间及南极磷虾粉脂肪含量、蛋白质含量、虾青素含量和色泽作为评价指标。干燥过程中的物料温度由干燥机内与南极磷虾物料直接接触的 K 型热电偶测量, 使用数据记录仪记录, 物料温度在干燥初期及切换干燥温度后变化剧烈, 干燥过程中每隔 10 min 记录 1 次物料温度。

第一梯级干燥温度设置 100、110、120、130 $^{\circ}\text{C}$ 共 4 组, 南极磷虾含水率降至 50% 后, 转

第二梯级干燥温度为 80 °C 进行干燥。

第二梯级干燥温度设置 60、70、80、90 °C 共 4 组, 第一梯级干燥温度设置为 110 °C, 南极磷虾含水率降至 50% 后, 转相应的第二梯级干燥温度进行干燥。

梯级切换水分含量设置 30%、40%、50%、60% 共 4 组, 干燥前期温度设置为 110 °C, 待南极磷虾含水率降至相应阶段, 转第二梯级干燥温度 80 °C 进行干燥。

响应面试验 在单因素试验研究的基础上, 运用 Box-Behnken 试验设计原理, 设计三因素三水平优化实验, 以第一梯级干燥温度 (A)、梯级切换水分含量 (B)、第二梯级干燥温度 (C) 为因素, 以干燥时间、南极磷虾脂肪和虾青素含量为评价指标, 根据单因素试验结果, 确定各个试验因素 (表 1)。

表 1 试验因素水平表

Tab. 1 Factors and levels of the test

水平 level	A	B	C
-1	100	30	70
0	110	40	80
1	120	50	90

注: A. 第一梯级干燥温度(°C), B. 梯级切换水分含量(%), C. 第二梯级干燥温度(°C), 下同。
Notes: A. first stage drying temperature (°C), B. stage switching moisture (%), C. second stage drying temperature (°C); the same below.

1.4 相关指标测定

脂肪的提取与测定 采用索氏抽提法, 参考 GB 5009.6—2016^[22]。

虾青素的提取与测定 参考孙来娣等^[23] 和马田田等^[24] 的方法稍作修改, 采用有机溶剂浸提法, 准确称取南极磷虾粉样品 1.00 g, 加入 30 mL 无水乙醇, 超声提取 15 min 后置于 50 °C 恒温水浴锅中浸提 3 h, 经过滤后得到待测样品, 设置紫外可见分光光度计 474 nm, 测定其吸光度, 每组样品平行测定 3 次。

虾青素标准曲线的绘制: 精确称取 5.0 mg 虾青素标准品, 溶于 50 mL 无水乙醇中, 配置成 100 µg/mL 的虾青素母液, 配置 1、2、3、4、5、6 µg/mL 浓度的标准溶液, 在 474 nm 下测定其吸光度, 得到标准曲线, 公式:

$$Y = 0.0653x + 0.0471, R^2 = 0.999$$

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 软件整理数据, Origin 2018 软件作图, SPSS 19.0 软件的 Duncan 氏检验对实验数据进行方差分析 ($P < 0.05$ 为差异显著), Design-Expert 13 软件对响应面试验数据进行回归分析, 数据以平均值±标准差表示。

2 结果

2.1 单因素试验结果

第一梯级干燥温度对南极磷虾粉品质的影响 在第二梯级干燥温度 80 °C, 梯级切换水分含量 50% 的条件下, 第一梯级干燥温度 (100、110、120、130 °C) 对南极磷虾干燥时间和物料温度的影响如图 1 所示, 对南极磷虾粉品质的影响如图 2 所示。

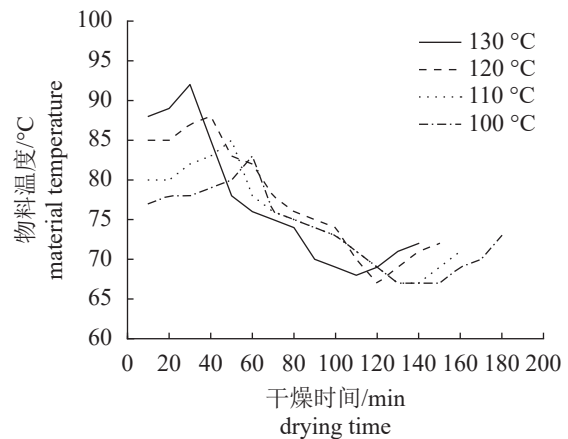


图 1 不同第一梯级干燥温度对干燥时间和物料温度的影响

Fig. 1 Effect of different first stage drying temperatures on drying time and material temperature

较高的干燥温度能提升干燥过程中的物料温度。由图 1 可知, 随着第一梯级干燥温度的升高, 干燥时间逐渐缩短, 从 100 °C 每升高 10 °C, 干燥时间依次缩短 20、10 和 5 min, 随着温度的升高, 不同第一梯级干燥温度下物料的干燥时间有显著差异, 干燥温度为 100~110 °C 时, 缩短的干燥时间多于 110~120 °C 时。因此选择合适的第一梯级干燥温度可有效提高干燥效率。

由图 2 可知, 第一梯级干燥温度对脂肪含量、虾青素含量均有显著差异。随着第一梯级干燥温度的升高, 脂肪含量先升高后降低, 100~110 °C

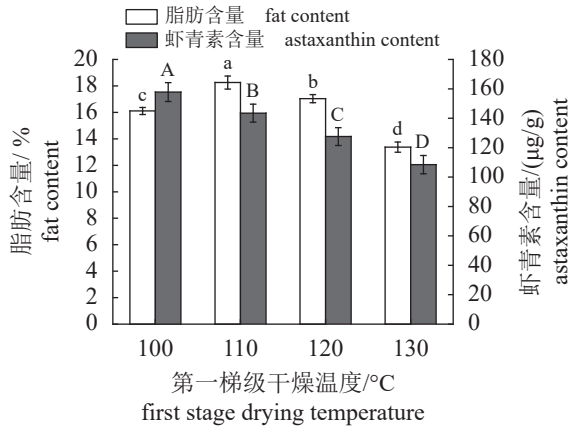


图2 第一梯级干燥温度对脂肪、虾青素含量的影响
不同小写字母表示脂肪含量差异显著, 不同大写字母表示虾青素含量差异显著, $P < 0.05$, 下同。

Fig. 2 Effect of first-stage drying temperature on fat and astaxanthin content

Different lowercase letters indicate significant differences in fat content, different uppercase letters indicate significant differences in astaxanthin content, $P < 0.05$, the same below.

内脂肪含量呈现升高的趋势, 110~130 °C 内脂肪含量呈现下降的趋势, 其中 110 °C 时脂肪含量最高, 为 $18.25\% \pm 0.49\%$; 南极磷虾虾青素含量随着第一梯级干燥温度的升高而减少, 100 °C 时虾青素含量最高, 为 $(157 \pm 6.43) \mu\text{g/g}$, 由于虾青素为热敏性物质, 过高的干燥温度使虾青素的损失变大, 在 130 °C 时虾青素含量最低。

梯级切换水分含量对南极磷虾粉品质的影响 在第一梯级干燥温度 110 °C, 第二梯级干燥温度 80 °C 的条件下, 60%、50%、40%、30% 梯级切换水分含量对南极磷虾干燥时间和物料温度的影响见图 3, 对南极磷虾粉品质的影响见图 4。

随着梯级切换水分含量提高, 干燥时间逐渐增加, 从 30% 开始, 每提高 10%, 干燥时间依次增加 15、15、30 min, 随着梯级切换水分含量提高, 不同梯级切换水分含量下干燥时间有显著差异 (图 3)。相比于第一梯级干燥温度, 梯级切换水分含量对干燥时间的影响较小。

随着梯级切换水分含量的提高, 脂肪含量呈现先升高后降低的趋势 (图 4)。当梯级切换水分含量为 40% 时脂肪含量最高, 为 $19.04\% \pm 0.21\%$; 梯级切换水分含量由 30% 提高至 40%, 脂肪含量提高 2.86%, 变化显著。梯级切换水分含量在 40%~60% 时, 每提高 10%, 脂肪含量降低 0.6%、1.1%, 提高至 60% 时对脂肪含量影响显著。南极磷虾虾青素含量随着梯级切换水分含量的提高而

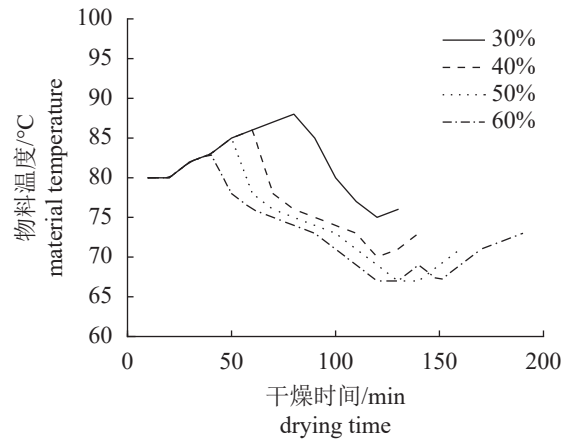


图3 不同梯级切换水分含量对干燥时间和物料温度的影响

Fig. 3 Effect of different stage switching moisture on drying time and material temperature

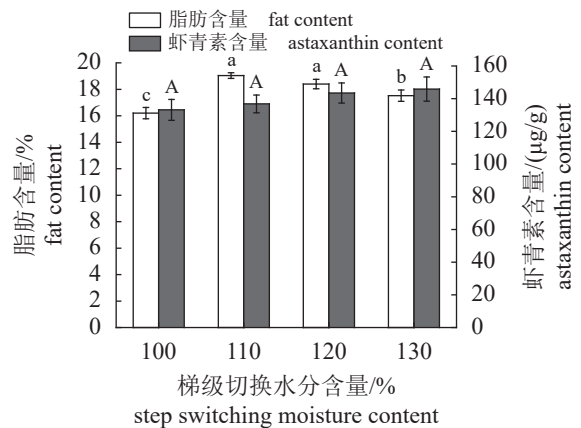


图4 梯级切换水分含量对脂肪、虾青素含量的影响
Fig. 4 Effect of stage switching moisture on fat and astaxanthin content

增加, 在 60% 时最高, 为 $(145.87 \pm 7.39) \mu\text{g/g}$, 转换点水分含量对虾青素的影响不显著。

第二梯级干燥温度对南极磷虾粉品质的影响 在第一梯级干燥温度 110 °C, 梯级切换水分含量 50% 的条件下, 60、70、80、90 °C 第二梯级干燥温度对南极磷虾干燥时间和物料温度的影响见图 5, 对南极磷虾粉品质的影响见图 6。

随着第二梯级干燥温度的增加, 干燥时间逐渐缩短 (图 5), 从 60 °C 开始, 每升高 10 °C, 干燥时间依次缩短 80、45、35 min, 随着温度升高, 不同第二梯级干燥温度下的干燥时间有显著差异。相比于第一梯级干燥温度、第二梯级干燥温度对干燥时间的影响更大。

随着第二梯级干燥温度的升高, 脂肪含量呈

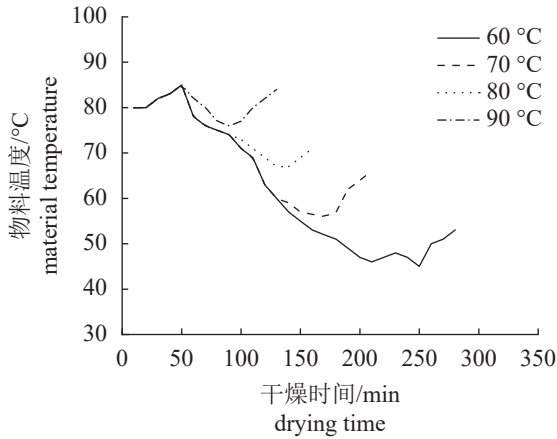


图5 不同第二梯级干燥温度对干燥时间和物料温度的影响

Fig. 5 Effect of different second stage drying temperatures on drying time and material temperature

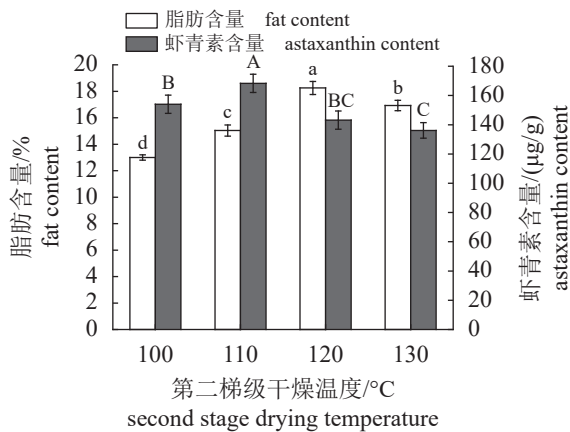


图6 第二梯级干燥温度对脂肪、虾青素含量的影响
Fig. 6 Effect of second stage drying temperature on fat and astaxanthin content

现先升高后降低的趋势, 当第二梯级干燥温度为 80 °C 时脂肪含量最高, 为 18.25%±0.49%, 第二梯级干燥温度为 60~80 °C 时, 每升高 10 °C, 脂肪含量分别增加 3.01%、6.02%, 第二梯级干燥温度在 80~90 °C 时, 脂肪含量减少了 1.33%, 不同第二梯级干燥温度对脂肪含量影响均显著 (图 6)。南极磷虾虾青素含量随着第二梯级干燥温度的升高呈现先升高后降低的趋势, 在 70 °C 时最高为 (168.28±6.20) μg/g, 当第二梯级干燥温度升高至 80 °C 时, 虾青素含量显著降低, 在 90 °C 时虾青素含量最低。

2.2 响应面试验结果

通过响应面分析第一梯级干燥温度 (A)、第

二梯级干燥温度 (B)、梯级切换水分含量 (C) 这 3 个因素对干燥时间、虾青素含量和脂肪含量的综合评分值的影响, 响应面试验方案和结果如表 2 所示, 表中数据共计 17 组试验, 其中 12 组为析因试验, 5 组为中心点试验。

表 2 响应面试验设计与结果

Tab. 2 Response surface test design and results

试验号 test no.	A	B	C	干燥时间/ min drying time (Y ₁)	脂肪 含量/% fat content (Y ₂)	虾青素 含量/ (μg/g) astaxanthin content (Y ₃)
1	0	1	-1	220	14.11	159.41
2	0	0	0	200	18.72	139.56
3	-1	-1	0	195	14.33	156.74
4	-1	0	-1	215	13.57	156.81
5	0	0	0	195	18.59	139.32
6	0	0	0	195	19.05	138.17
7	1	0	1	130	12.59	163.02
8	-1	1	0	215	16.11	158.59
9	-1	0	1	145	16.57	161.70
10	0	0	0	200	19.28	136.41
11	0	-1	-1	180	14.11	159.96
12	0	1	1	160	17.40	160.45
13	1	-1	0	120	14.81	160.63
14	0	0	0	200	19.15	137.60
15	1	0	-1	140	11.28	162.00
16	1	1	0	165	17.04	128.63
17	0	-1	1	130	15.21	163.15

干燥时间的回归方程的建立 以干燥时间为响应值的模型极显著 ($P < 0.01$), 失拟项 $P = 0.242 > 0.05$, 表明失拟不显著, 说明该模型与试验数据之间拟合度较好 (表 3)。其中干燥时间 (Y_1) 回归模型一次项 A、B、C 和二项式 AC、 A^2 、 C^2 影响为极显著 ($P < 0.01$), 通过比较各因素 F 值大小可判断其对干燥时间影响的大小, 影响从大到小依次为: 第一梯级干燥温度 (A) > 第二梯级干燥温度 (C) > 梯级切换水分含量 (B)。决定系数 $R^2 = 0.9744$, 修正决定系数 $R^2_{adj} = 0.9415$, 说明模型可以解释和预测 97% 的响应值变化, 变异系数 $CV = 4.51 < 10\%$, 表明试验值的变异在合理范围内。

对表 3 中数据进行拟合, 得到南极磷虾螺旋加热干燥的干燥时间 Y_1 的回归方程为:

$$Y_1 = 194 - 26.88A + 16.88B - 23.75C + 6.25AB + 15AC - 2.5BC - 17.63A^2 - 2.63B^2 - 19.01C^2$$

表 3 干燥时间回归方程方差及显著性检验

Tab. 3 Drying time regression equation variance and significance test

方差来源 source	平方和 SS	自由度 df	均方 YMS	F值 F value	P值 P value
Y ₁ 模型 Y ₁ model	16 705.37	9	1 856.15	29.61	< 0.000 1**
A	5 778.13	1	5 778.13	92.19	< 0.000 1**
B	2 278.12	1	2 278.12	36.35	0.000 5**
C	4 512.5	1	4 512.5	71.99	< 0.000 1**
AB	156.25	1	156.25	2.49	0.158 4
AC	900	1	900	14.36	0.006 8**
BC	25	1	25	0.399	0.547 7
A ²	1 307.96	1	1 307.96	20.87	0.002 6**
B ²	29.01	1	29.01	0.463	0.518 1
C ²	1 500.07	1	1 500.07	23.93	0.001 8**
残差 residual	438.75	7	62.68		
失拟项 lack of fit	268.75	3	89.58	2.11	0.242
误差 pure error	170	4	42.5		
总和 total	17 144.12	16			

注: *表示具有显著影响($P<0.05$), **表示具有极显著影响($P<0.01$), 下同。
Notes: * indicates a significant effect ($P<0.05$), ** indicates a highly significant effect ($P<0.01$), the same below.

脂肪含量的回归方程的建立 以脂肪含量为响应值的模型极显著 ($P<0.01$), 失拟项 $P=0.150>0.05$ 表明失拟不显著, 说明该模型与试验数据之间拟合度较好 (表 4)。其中脂肪含量 (Y_2) 回归模型二次项 C^2 影响为极显著 ($P<0.01$), 一次项 A、B 和二项式 BC、 A^2 影响为显著 ($P<0.05$), 通过比较各因素 F 值大小可判断其对干燥时间影响的大小, 影响从大到小依次为: 梯级切换水分含量 (B)>第一梯级干燥温度 (A)>第二梯级干燥温度 (C)。决定系数 $R^2=0.955 1$, 修正决定系数 $R^2_{adj}=0.897 4$, 说明模型可以解释和预测 95% 的响应值变化, 变异系数 $CV=5.08<10\%$, 表明试验值的变异在合理范围内。

对表 4 中数据进行拟合得到南极磷虾螺旋加热干燥的脂肪含量 Y_2 的回归方程为:

$$Y_2 = 18.17 - 0.73A + 0.90B + 0.08C + 0.36AB + 0.08AC + 1.05BC - 1.31A^2 - 0.57B^2 - 3.92C^2$$

虾青素含量的回归方程的建立 由表 5 可知, 以脂肪含量为响应值的模型极显著 ($P<0.01$), 失拟项 $P=0.13>0.05$ 表明失拟不显著, 说

表 4 脂肪含量回归方程方差及显著性检验

Tab. 4 Fat content regression equation variance and significance test

方差来源 source	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F值 F value	P值 P value
Y ₂ 模型 Y ₂ model	91.9	9	10.21	16.56	0.000 6**
A	4.29	1	4.29	6.96	0.033 5*
B	6.5	1	6.5	10.54	0.014 1*
C	0.056	1	0.056	0.091	0.771 7
AB	0.526	1	0.526	0.852	0.386 6
AC	0.024	1	0.024	0.039	0.849 1
BC	4.37	1	4.37	7.08	0.032 4*
A ²	6.92	1	6.92	11.22	0.012 3*
B ²	1.37	1	1.37	2.21	0.180 3
C ²	63.7	1	63.7	103.28	< 0.000 1**
残差 residual	4.32	7	0.617		
失拟项 lack of fit	3.03	3	1.01	3.12	0.150
误差 pure error	1.29	4	0.323		
总和 total	96.22	16			

表 5 虾青素含量回归方程方差及显著性检验

Tab. 5 Variance and significance test of regression equation for astaxanthin content

方差来源 source	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F值 F value	P值 P value
Y ₃ 模型 Y ₃ model	2 396.3	9	266.26	9.74	0.003 3**
A	443.42	1	443.42	16.21	0.005 0**
B	80.64	1	80.64	2.95	0.129 6
C	362.61	1	362.61	13.26	0.008 3**
AB	286.46	1	286.46	10.47	0.014 3*
AC	481.14	1	481.14	17.59	0.004 1**
BC	8.56	1	8.56	0.313	0.593 4
A ²	86.7	1	86.70	3.17	0.118 2
B ²	296.94	1	296.94	10.86	0.013 2*
C ²	278.49	1	278.49	10.18	0.015 3*
残差 residual	191.43	7	27.35		
失拟项 lack of fit	184.77	3	61.59	36.94	0.192
误差 pure error	6.67	4	1.67		
总和 total	2 587.73	16			

明该模型与试验数据之间拟合度较好。其中虾青素含量 (Y_3) 回归模型一次项 A、C 和二次项 AC

影响为极显著 ($P < 0.01$), 二项式 AB 、 B^2 、 C^2 影响为显著 ($P < 0.05$), 通过比较各因素 F 值大小可判断其对干燥时间影响的大小, 影响从大到小依次为: 第一梯级干燥温度 (A) > 第二梯级干燥温度 (C) > 梯级切换水分含量 (B)。决定系数 $R^2 = 0.9260$, 修正决定系数 $R^2_{adj} = 0.8309$, 说明模型可以解释和预测 92% 的响应值变化, 变异系数 $CV = 3.53 < 10\%$, 表明试验值的变异在合理范围内。

对表 5 中数据进行拟合得到南极磷虾螺旋加热干燥的虾青素含量 Y_3 的回归方程为:

$$Y_3 = 148.21 - 7.44A - 3.17B - 6.73C - 8.46AB - 10.97AC + 1.46BC + 4.54A^2 + 8.64B^2 + 8.37C^2$$

交互项响应面分析 响应面图可直观反映出各个因素对响应值影响的大小, 当响应面的坡度较平缓, 表明响应值受该因素的影响较小; 反之, 当响应面的坡度较陡时, 表示响应指标受该

因素影响程度较大。由表 2~表 4 可知, 干燥时间 (Y_1) 受 AC 交互项影响显著, 脂肪含量 (Y_2) 受 BC 交互项影响显著, 虾青素含量 (Y_3) 受 AC 、 AB 交互项影响显著, 分别绘制交互项响应面图 (图 7)。

图 7-a 显示了在梯级切换水分含量 40% 下, 第一梯级干燥温度与第二梯级干燥温度对干燥时间的交互作用。干燥时间随着第一梯级干燥温度和第二梯级干燥温度的升高呈现逐渐减少的趋势。这是由于提高温度, 加大了南极磷虾表面和内部的温度及湿度梯度, 提高了传热传质的推动力, 进而提高了干燥效率。试验条件范围内, 第一梯级干燥温度 120 °C、第二梯级干燥温度 90 °C, 干燥时间的预测值为 128.17 min, 达到最小。

图 7-b 显示了第一梯级干燥温度 110 °C 下, 梯级切换水分含量和第二梯级干燥温度对脂肪含量的交互作用。分析可知脂肪含量随着梯级切换

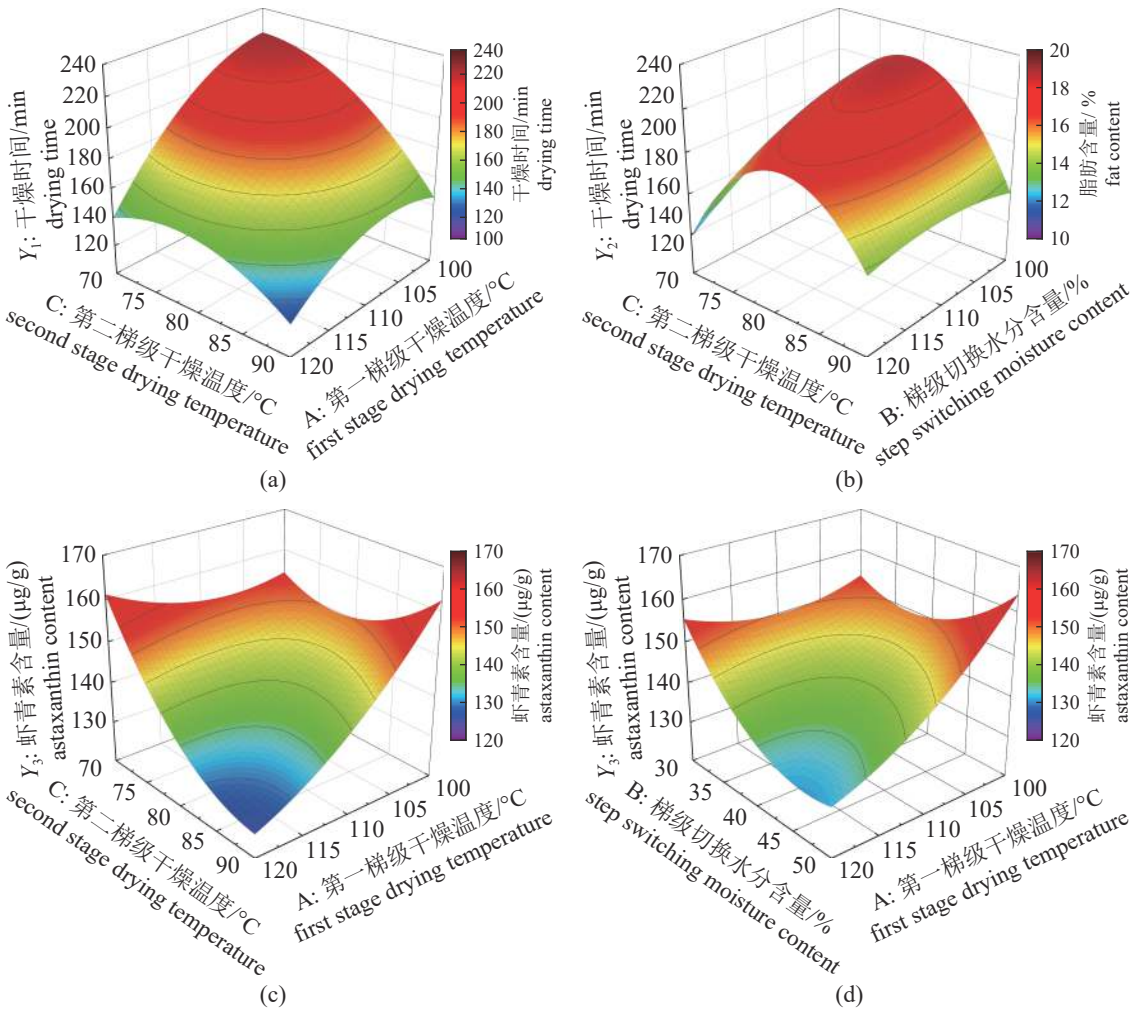


图 7 第一梯级干燥温度、梯级转换水分含量、第二梯级干燥温度交互作用的响应面图

Fig. 7 Plot of the response of the first stage drying temperature and the second stage drying temperature to the drying time

水分含量和第二梯级干燥温度的升高呈现先增大后减小的趋势。响应面坡度随着梯级切换水分含量和第二梯级干燥温度的增加而更加陡峭, 说明较高的梯级切换水分含量和第二梯级干燥温度不利于南极磷虾粉脂肪的保留。

图 7-c 显示了在梯级切换水分含量 40% 下, 第一梯级干燥温度与第二梯级干燥温度对虾青素含量的交互作用。分析可知虾青素含量随着第一梯级干燥温度与第二梯级干燥温度的升高呈现减少的趋势。图 7-d 显示了在第二梯级干燥温度 80 °C 下, 第一梯级干燥温度和梯级切换水分含量对虾青素含量的交互作用。分析可知虾青素含量随着第一梯级干燥温度和梯级切换水分含量的升高呈现减少的趋势。相比于第一梯级干燥温度和梯级切换水分含量, 第一梯级干燥温度与第二梯级干燥温度对虾青素含量的交互作用响应面坡度更为陡峭, 说明第一梯级干燥温度与第二梯级干燥温度对南极磷虾粉虾青素品质的影响更大。

螺旋加热梯级干燥参数的优化与验证

根据表 1 试验因素取值范围, 确定南极磷虾螺旋加热梯级干燥的最佳工艺条件, 以获得短的干燥时间和最大的脂肪、虾青素含量。得到的优化工艺参数为: 第一梯级干燥温度 104.95 °C、梯级切换水分含量 49.48%、第二梯级干燥温度 87.90 °C, 在此工艺条件下, 干燥时间、脂肪含量和虾青素含量分别为 157.22 min、16.57%、162.05 μg/g (表 6)。

为验证回归方程预测的准确性, 结合设备情况, 在第一梯级干燥温度 105 °C、梯级切换水分含量 50%、第二梯级干燥温度 88 °C 下进行 3 次平行试验, 得到的干燥时间、脂肪和虾青素含量实际值分别为 160 min、16.83%、159.32 μg/g, 相对误差分别为 1.73%、1.54%、1.71%, 实际值与试验值接近, 证明了模拟方程的可靠性。

2.3 螺旋梯级干燥效果验证

根据响应面优化结果, 采取最优梯级干燥工

艺 (第一梯级干燥温度 105 °C、梯级切换水分含量 50%、第二梯级干燥温度 88 °C, 堆料厚度 20 cm、搅拌速度 8 r/min), 与恒温干燥 (干燥温度 100 °C、堆料厚度 20 cm、搅拌速率 8 r/min) 进行干燥后品质对比 (表 6)。图 8 为不同干燥方式所得虾粉样品, 其中图 8-a 为螺旋恒温干燥样品, 图 8-b 为螺旋梯级干燥样品, 参考国内南极磷虾粉标准, 经梯级干燥后样品呈鲜红色, 色泽均匀。

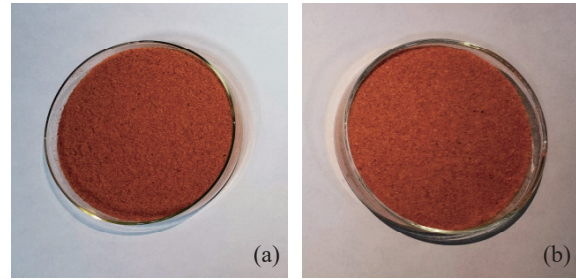


图 8 不同干燥方式南极磷虾粉样品图

(a) 螺旋恒温干燥样品, (b) 螺旋梯级干燥样品。

Fig. 8 Samples of Antarctic krill meal with different drying methods

(a) spiral constant temperature drying sample, (b) spiral staged drying sample.

相比于恒温干燥, 梯级干燥耗时增加 10 min; 梯级干燥较恒温干燥脂肪含量损失更小; 梯级干燥虾青素含量为 (159.32±5.19) μg/g, 相较于恒温干燥提高了 17.19 μg/g。梯级干燥南极磷虾粉品质优于恒温干燥 (表 7)。

3 讨论

南极磷虾粉粗脂肪含量约为 5%~15%^[3]。楼乔明等^[25]研究发现, 南极磷虾粉中脂质丰富, 其中含有 41.92% 甘油三酯、33.16% 磷脂、17.61% 游离脂肪酸, 总胆固醇含量较少, 为 1.44%。南极磷虾螺旋加热干燥过程中第一梯级干燥温度、第二梯级干燥温度和切换点水分含量均对虾粉脂质含量有显著影响。干燥过程中, 由于南极磷虾

表 6 响应面优化结果

Tab. 6 Response surface optimization results

项目 items	第一梯级干燥温度/°C first stage drying temperature	梯级切换水分含量/% stage switching moisture	第二梯级干燥温度/°C second stage drying temperature	干燥时间/min drying time	脂肪含量/% fat content	虾青素含量/(μg/g) astaxanthin content
优化参数 optimize parameters	104.95	49.48	87.90	157.22	16.57	162.05
试验验证 experimental validation	105	50	88	160	16.83±0.47	159.32±5.19

表 7 不同干燥方式的干燥效果比较

Tab. 7 Quality comparison results

干燥方式 drying method	干燥时间/min drying time	脂肪含量/% fat content	虾青素含量/($\mu\text{g/g}$) astaxanthin content
梯级干燥 staged drying	160	16.83 \pm 0.47	159.32 \pm 5.19
恒温干燥 constant drying	150	16.42 \pm 0.73	142.13 \pm 6.43

内部水分蒸发, 南极磷虾中脂肪与氧气的接触概率增加, 而高温又可以催化脂肪氧化的链式反应, 加快脂质氧化。石慧等^[26]对脂肪含量和脂肪酸中的不饱和脂肪酸含量较高的卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)进行研究, 结果发现较高第一、第二阶段干燥温度会导致鱼肉脂肪过度氧化, 产生不良风味, 从而影响产品的色泽和风味。高翠竹等^[27]研究发现, 不同温度下热风干燥南极磷虾的产品其过氧化值、酸值、TBA 值相比于冷风干燥均有增加, 干燥温度是影响干燥过程中南极磷虾脂肪氧化的关键因素, 温度较低或较高均能引起脂肪的不同程度氧化。

虾青素分子结构中的羟基和羰基使其具有独特的生物活性, 但羟基、羰基易被氧化, 且其长共轭结构的不饱和特性, 导致其性质极不稳定^[28]。南极磷虾螺旋加热干燥过程中第一梯级干燥温度和第二梯级干燥温度对虾粉虾青素含量有显著影响, 转变点水分含量对虾青素影响不显著。由于在干燥过程中, 南极磷虾水分含量不断下降, 虾青素逐渐暴露在低湿高热的环境中, 极易发生降解, 且虾青素抗氧化能力较强, 容易在干燥过程中与其他物质发生反应, 进一步加剧了虾青素的降解。林雅文等^[29]对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的干燥过程进行研究, 发现热处理温度和时间是影响虾青素热降解的关键因素。此外, 南极磷虾体内脂肪和蛋白质的氧化程度也会影响虾青素的含量。

本研究的梯级干燥工艺, 是根据南极磷虾不同干燥阶段的干燥特性而采用不同干燥温度。南极磷虾在不同干燥条件下的干燥时间、脂肪含量、虾青素含量均存在显著差异, 造成干燥时间和虾青素含量差异的主要原因是第一梯级干燥温度和第二梯级干燥温度, 造成脂肪含量差异的主要原因是梯级切换水分含量和第一梯级干燥温度。相比于恒温干燥与热风干燥, 梯级干燥的脂肪含量与虾青素含量增加, 表明梯级干燥能在一定程度上对南极磷虾营养成分及抗氧化成分起到保护作用,

这与罗宸东等^[30]的研究结果相似。梯级干燥相比恒温干燥时间较长, 这可能是由于在梯级切换水分节点后干燥温度降低导致水分迁移速率变慢, 干燥效率降低, 为提高干燥效率, 可在干燥后期采用联合干燥方式。李敏等^[31]研究了两次变温与一次变压的组合调节对栉孔扇贝(*Azumapecten farreri*)干燥的影响, 结果发现变温变压干燥能明显减少干燥时间和能耗, 而且有利于提高干制品的综合性能指标。马田田^[32]研究发现闪蒸微波联合干燥可提高干燥效率, 降低干燥能耗, 有效保留虾粉中营养成分含量。张帅帅等^[33]研究发现真空干燥能有效抑制虾粉中虾青素在干燥中的降解和脂肪氧化, 同时保证干燥效率。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

[1] Nicol S, Foster J, Kawaguchi S. The fishery for Antarctic krill-recent developments[J]. *Fish and Fisheries*, 2012, 13(1): 30-40.

[2] Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E A, et al. A reappraisal of the total biomass and annual production of Antarctic krill[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(5): 727-740.

[3] 平泽禹, 郑尧, 郭全友, 等. 不同规格南极磷虾营养品质差异研究 [J]. *食品与发酵科技*, 2022, 58(3): 82-91.

Ping Z Y, Zheng Y, Guo Q Y, et al. Study on the difference in nutritional quality of different sizes of Antarctic krill[J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2022, 58(3): 82-91 (in Chinese).

[4] Wang Y Z, Zhao Y Q, Wang Y M, et al. Antioxidant peptides from Antarctic krill (*Euphausia superba*) hydrolysate: preparation, identification and cytoprotection on H₂O₂-induced oxidative stress[J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 86: 104701.

[5] Zhang M H, Zhu J R, Zhou L, et al. Antarctic krill oil high internal phase Pickering emulsion stabilized by bamboo protein gels and the anti-inflammatory effect *in vitro* and *in vivo*[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 94: 105134.

[6] 李玉锋, 王敬敬, 檀利军, 等. 可溶性南极磷虾蛋白-芦丁复合物的制备及抗氧化性能分析 [J]. *水产学报*, 2022, 46(3): 475-485.

- Li Y F, Wang J J, Tan L J, *et al.* Preparation and antioxidant properties of soluble Antarctic krill protein-rutin complexes[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(3): 475-485 (in Chinese).
- [7] 王元好, 马岩, 袁起新, 等. 南极磷虾油制备技术及其生理功能的研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(21): 220-224.
- Wang Y H, Ma Y, Yuan Q X, *et al.* Research progress on extraction and function of antarctic krill oil[J]. *Research and Development*, 2020, 41(21): 220-224 (in Chinese).
- [8] 刘丽, 刘承初, 赵勇, 等. 南极磷虾的营养保健功效以及食用安全性评价 [J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 443-447.
- Liu L, Liu C C, Zhao Y, *et al.* Recent advances in the healthcare function and food safety of Antarctic krill[J]. *Food Science*, 2010, 31(17): 443-447 (in Chinese).
- [9] Sjødahl J, Emmer Å, Vincent J, *et al.* Characterization of proteinases from Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. *Protein Expression and Purification*, 2002, 26(1): 153-161.
- [10] Wu Z Q, Wang J R, Shang X M, *et al.* Purification and characterization of cold adapted trypsins from Antarctic krill (*Euphausia superba*)[J]. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 2014, 20(4): 531-543.
- [11] 谈俊晓, 赵永强, 李来好, 等. 南极磷虾综合利用研究进展 [J]. *广东农业科学*, 2017, 44(3): 143-150.
- Tan J X, Zhao Y Q, Li L H, *et al.* Research progress on comprehensive utilization of Antarctic krill[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2017, 44(3): 143-150 (in Chinese).
- [12] 赵宪勇, 左涛, 冷凯良, 等. 南极磷虾渔业发展的工程科技需求 [J]. *中国工程科学*, 2016, 18(2): 85-90.
- Zhao X Y, Zuo T, Leng K L, *et al.* Engineering science and technology challenges in the Antarctic krill fishery[J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(2): 85-90 (in Chinese).
- [13] 刘志东, 陈勇, 曲映红, 等. 挤压加工对南极磷虾粉营养成分组分的影响 [J]. *海洋渔业*, 2016, 38(3): 311-319.
- Liu Z D, Chen Y, Qu Y H, *et al.* Effect of pressing processing on the nutritional components of Antarctic krill powder[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(3): 311-319 (in Chinese).
- [14] 赵昕源, 欧阳杰, 马田田, 等. 南极磷虾体内主要营养活性物质在热处理过程中的流向 [J]. *水产学报*, 2021, 45(7): 1172-1180.
- Zhao X Y, Ouyang J, Ma T T, *et al.* Flow direction of main nutrient substances in Antarctic krill (*Euphausia superba*) during heat treatment[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(7): 1172-1180 (in Chinese).
- [15] 湛志新, 王志勇, 欧阳杰. 我国南极磷虾捕捞与加工装备科技发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2019, 21(6): 48-52.
- Chen Z X, Wang Z Y, Ouyang J. Development of technology for Antarctic krill fishing and processing equipment in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(6): 48-52 (in Chinese).
- [16] 欧阳杰, 马田田, 沈建. 南极磷虾虾粉加工干燥技术与设备应用分析 [J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(16): 216-219,282.
- Ouyang J, Ma T T, Shen J. Analysis on drying technology and equipment application of Antarctic krill powder processing[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(16): 216-219,282 (in Chinese).
- [17] 马靖松, 欧阳杰, 马田田, 等. 南极磷虾螺旋轴套加热干燥特性及干燥动力学模型 [J]. *渔业现代化*, 2024, 51(2): 102-112.
- Ma J S, Ouyang J, Ma T T, *et al.* Drying characteristics and drying kinetics modeling of Antarctic krill spiral bushing heated drying[J]. *Fishery Modernization*, 2024, 51(2): 102-112 (in Chinese).
- [18] 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.
- [19] 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 (in Chinese).
- [20] Xu X G, Zhao T Y, Ma J N, *et al.* Application of two-stage variable temperature drying in hot air-drying of paddy rice[J]. *Foods*, 2022, 11(6): 888.
- [21] 马田田, 欧阳杰, 肖哲非, 等. 南极磷虾变温热风干燥工艺研究 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 182-190.
- Ma T T, Ouyang J, Xiao Z F, *et al.* Hot-air drying of antarctic krill under variable temperature process[J]. *Sci-*

- ence and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 182-190 (in Chinese).
- [22] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of PRC, China Food and Drug Administration. Determination of fat in food: GB 5009.6-2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [23] 孙来娣, 高华, 刘坤, 等. 南极磷虾粉中虾青素的提取 [J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(3): 196-201.
- Sun L D, Gao H, Liu K, *et al.* Optimization of extraction method of astaxanthin from Antarctic krill powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(3): 196-201 (in Chinese).
- [24] 马田田, 欧阳杰, 赵昕源, 等. 不同干燥方式下南极磷虾干燥特性与主要营养物质变化 [J]. 渔业现代化, 2022, 49(2): 94-101.
- Ma T T, Ouyang J, Zhao X Y, *et al.* Changes in drying characteristics and major nutrients of Antarctic krill under different drying methods[J]. Fishery Modernization, 2022, 49(2): 94-101 (in Chinese).
- [25] 楼乔明, 王玉明, 杨文鸽, 等. 南极磷虾粉脂质及脂肪酸组成分析 [J]. 水产学报, 2012, 36(8): 1256-1262.
- Lou Q M, Wang Y M, Yang W G, *et al.* Lipid classes and fatty acid compositions of Antarctic krill meal[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(8): 1256-1262 (in Chinese).
- [26] 石慧, 杨少玲, 吴燕燕, 等. 卵形鲳鲹鱼片热风干燥条件优化及其品质特性研究 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(17): 129-135.
- Shi H, Yang S L, Wu Y Y, *et al.* Optimized hot air drying conditions and quality characteristics of *Trachinotus ovatus* fillet[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(17): 129-135 (in Chinese).
- [27] 高翠竹, 詹宏磊, 刘冰南, 等. 热风干燥加工对南极磷虾肉脂质品质的影响 [J]. 食品工业, 2021, 42(1): 151-156.
- Gao C Z, Zhan H L, Liu B N, *et al.* Effect of hot air drying on lipid quality in Antarctic krill meat[J]. The Food Industry, 2021, 42(1): 151-156 (in Chinese).
- [28] 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.
- [29] 林雅文, 李艾青, 田心怡, 等. 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 [J]. 中国食品学报, 2023, 23(9): 129-139.
- Lin Y W, Li A Q, Tian X Y, *et al.* Effect of medium and short-wave infrared drying temperature on drying characteristics, astaxanthin content and microstructure of *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(9): 129-139 (in Chinese).
- [30] 罗宸东, 宋萧萧, 李昱昊, 等. 干燥方式对茶树菇营养组分和挥发性成分的影响 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2023, 47(5): 426-432,440.
- Luo C D, Song X X, Li Y H, *et al.* Effects of different drying methods on nutritional components and volatile components of *Agrocybe cylindracea*[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science Edition), 2023, 47(5): 426-432,440 (in Chinese).
- [31] 李敏, 关志强, 蒋小强, 等. 变温变压的优化组合对扇贝真空冷冻干燥过程影响的实验研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(4): 357-361.
- Li M, Guan Z Q, Jiang X Q, *et al.* Optimization of vacuum freeze-drying conditions of scallop[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(4): 357-361 (in Chinese).
- [32] 马田田. 南极磷虾粉干燥工艺研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- Ma T T. Study on drying technology of Antarctic krill powder[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese).
- [33] 张帅帅, 郑尧, 郭全友, 等. 南极磷虾粉真空干燥特性及其对其品质的影响 [J]. 包装工程, 2024, 45(5): 91-100.
- Zhang S S, Zheng Y, Guo Q Y, *et al.* Vacuum drying characteristics and their effect on quality of Antarctic krill meal[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(5): 91-100 (in Chinese).

Optimization and validation of spiral staged drying process for *Euphausia superba* meal

OUYANG Jie ^{1*}, MA Jingsong ^{1,2}, MA Tiantian ¹, HUANG Tian ¹, SHEN Jian ¹

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Antarctic krill (*Euphausia superba*) meal is one of the most important processed products of *E. superba*, and its quality is critical to the quality of the subsequent shrimp oil and other deep processing products. However, in the yield and quality of *E. superba* meal processing, there is still a big gap between China and leading countries in the *E. superba* industry such as Norway. Spiral drying has the advantages of autonomously pushing material and reducing the accumulation of materials, suitable for *E. superba* drying; compared to constant temperature drying, staged drying process can consider the drying efficiency and energy consumption, and can effectively ensure the stability of product quality. In order to optimize the spiral drying process parameters of *E. superba* powder and obtain a high quality and efficient drying process of *E. superba* meal, the staged drying process of *E. superba* was studied by using spiral drying equipment, and the optimum experiment was designed on the basis of Box-Behnken experimental design principle based on single factor experiment. The effects of the first stage drying temperature, the switch node and the second stage drying temperature on the drying time, the content of fat and astaxanthin were studied. The results showed that the order of influence of different factors on drying time and astaxanthin content was first stage drying temperature (A) > second stage drying temperature (C) > stage switching moisture (B), and the order of influence on fat content was stage switching moisture (B) > first stage drying temperature (A) > second stage drying temperature (C). Response surface obtained the optimal process parameters for the first stage drying temperature at 105 °C, stage switching moisture of 50%, the second stage drying temperature of 88 °C. Under this condition, drying time, fat and astaxanthin content were 160 min, 16.83%, and 159.32 µg/g, respectively; the quality of the *E. superba* meal under the spiral staged drying were better than that of spiral constant temperature drying. The study shows that the use of an optimized spiral drying process can effectively improve the quality of shrimp meal while ensuring drying efficiency. This study can provide technical references for the high-quality production of *E. superba* and *E. superba* meal shipboard processing technology and the development of localization of key equipment.

Key words: *Euphausia superba*; spiral drying; drying process; quality

Corresponding author: OUYANG Jie. E-mail: ouyangjie@fmiri.ac.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2023YFD2401200)