

# 脱毒海星微波真空干燥工艺优化

张国琛, 李 莎, 张 倩, 李秀辰, 牟春发

(大连海洋大学机械与动力工程学院辽宁省渔业装备工程技术研究中心, 大连 116023)

**摘 要:** 为了提高脱毒海星干燥效率、品质及降低能耗, 选择微波真空干燥方法进行试验研究。通过单因素试验研究了微波功率密度、脉冲时间及真空度对干燥特性、能耗及蛋白质保留率的影响。结果表明, 在 3~7 W/g、20~60 s 和 -0.070~-0.090 MPa 范围内, 较高的微波功率密度、较长的脉冲时间和较高的负压会缩短干燥时间、提高干燥平均速率、降低能耗; 提高微波功率密度不利于蛋白质的保留, 缩短脉冲时间和提高负压可提高脱毒海星的蛋白质保留率。利用响应面法探讨了微波功率密度、脉冲时间及真空度对脱毒海星微波真空干燥工艺的综合影响, 建立了二次多项式回归模型, 并对干燥工艺参数进行了优化。通过分析得出各因素影响显著性依次为微波功率密度>脉冲时间>真空度, 微波功率密度、脉冲时间对脱毒海星微波真空干燥有极显著性影响 ( $P<0.01$ ), 且微波功率密度与脉冲时间的交互作用比较明显 ( $P<0.05$ ); 脱毒海星的最佳微波真空干燥条件为微波功率密度为 4 W/g, 脉冲时间为 60 s 和真空度为 -0.090 MPa, 在此条件下脱毒海星微波真空干燥的综合评分最高, 为 0.751。研究结果可为脱毒海星干燥的工业化生产和有效利用提供参考。

**关键词:** 干燥; 模型; 优化; 脱毒海星; 能耗; 蛋白质保留率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.039

中图分类号: TS 254.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0289-07

张国琛, 李 莎, 张 倩, 李秀辰, 牟春发. 脱毒海星微波真空干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 289—295. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.039 http://www.tcsae.org

Zhang Guochen, Li Sha, Zhang Qian, Li Xiuchen, Mu Chunfa. Optimization of microwave-vacuum drying for detoxified starfish[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 289—295. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.039 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

海星又名星鱼或海盘车, 生存能力和再生力极强, 分布于潮间带至 6 000 m 水深内, 若将之切成数块扔入海中, 每块均可再生成海星。据调查估测, 仅大连沿海海星年产量可达 5 万 t<sup>[1]</sup>, 海星为肉食性动物, 生性凶残, 在海内常吞食牡蛎、扇贝、鲍鱼等海珍品, 是海水养殖业的一大天敌。海星蛋白质含量较高, 氨基酸组成齐全, 必需氨基酸间比例较为合理, 接近优质蛋白质<sup>[2]</sup>。牛磺酸和锌的质量分数可分别达到 12.35 mg/g 和 77.60  $\mu\text{g/g}$ , 长期摄入可促进生长发育<sup>[3]</sup>, 且甾醇、多糖等活性成分丰富, 具有抗癌、抗菌等药理活性<sup>[4]</sup>。因此海星可资源化利用为蛋白质饲料。海星的体壁(棘皮)、胃、消化腺、生殖腺皆含有毒物质-皂苷, 过量食用会引发呕吐、头晕、昏迷甚至会造成死亡, 而将脱除部分皂苷的海星(以下简称脱毒海星)作为蛋白质饲料则取得了良好的喂养效果<sup>[3]</sup>。因此将脱毒海星开发为新型蛋白质饲料资源具有十分巨大的潜力。

当前脱毒海星主要通过自然风干和热风干燥<sup>[3]</sup>的方式进行干燥, 但自然风干对自然条件依赖性大且干制品

的品质与产量也难以得到保证<sup>[5]</sup>, 而热风干燥的时间长, 容易造成营养成分的损失。微波真空干燥是近年来广泛应用的一种干燥技术, 微波的穿透性使其在干燥效率较高<sup>[6]</sup>的同时具有能源利用率高、便于控制、物料营养成分保留率高等优点<sup>[7]</sup>。Lin 等对小虾进行微波真空干燥试验, 发现将其干燥至终点仅需 15 min, 分别为热风干燥及冷冻干燥所需时间的 1/16 和 1/288, 可获得较好的收缩率和复水率, 且色泽、组织和风味等与复水冷冻虾接近<sup>[8]</sup>; 关志强等将热泵干燥技术与微波干燥技术联合对罗非鱼片进行干燥, 并与相同温度和风速条件下的热泵干燥试验结果进行比较, 热泵-微波联合干燥时间比热泵干燥时间缩短了 2/3; 复水率增加了 46.5%<sup>[9]</sup>; 张国琛等对中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)进行微波真空干燥试验研究时发现, 在较低的微波功率密度和较高的负压条件下, 对虾具有较大的复水率和较小的收缩率<sup>[10]</sup>。张倩等在用微波真空干燥技术处理虾夷扇贝闭壳肌时发现: 在较低的微波功率密度和较小的脉冲时间条件下, 物料中蛋白质和多糖等营养成分保留率较高<sup>[11]</sup>。

目前尚未见脱毒海星的微波真空干燥试验研究报道, 本文在单因素试验的基础上, 就脱毒处理后海星棘皮的微波真空干燥进行了以微波功率密度、脉冲时间、真空度为影响因素, 以干燥平均速率、能耗以及蛋白质保留率的综合评分为目标值的响应面试验, 并得出脱毒海星微波真空干燥加工的最优工艺技术参数, 为脱毒海星的增值开发利用提供初步加工方法, 实现资源良性循环, 变废为宝, 从

收稿日期: 2015-06-26 修订日期: 2015-07-17

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目(2015103021); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(042214106)

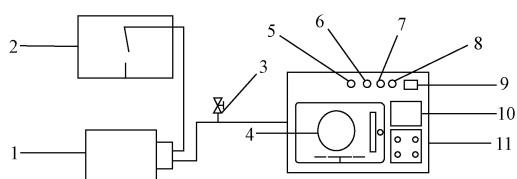
作者简介: 张国琛, 男, 博士, 教授, 主要从事水产品加工工艺与装备研究。大连 大连海洋大学机械与动力工程学院辽宁省渔业装备工程技术研究中心, 116023。Email: zhangguochen@dlo.edu.cn

而推动中国海水养殖业及畜牧业的发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要仪器设备

MZ08S-1A 型微波真空干燥箱(南京汇研微波系统工程有限公司)如图 1 所示。微波功率及脉冲时间可根据需要于显示屏上设置;真空度的大小可通过调节微波真空干燥系统中调压阀的开启程度而进行控制,最大真空度为 $-0.095\text{ MPa}$ ;物料温度由欧普士 S20A-3 型非接触式红外测温传感器实时监测控制(深圳欧普士电子技术有限公司,测温控温范围 $0\sim 350^{\circ}\text{C}$ );设备加热室有效尺寸( $360\text{ mm}\times 360\text{ mm}\times 270\text{ mm}$ ),容积约 $35\text{ L}$ ;干燥时将物料置于干燥腔体内玻璃转盘上,物料可随其匀速转动而均匀接受微波。



1.水环式真空泵;2.循环水箱;3.调节阀;4.观察窗;5.电源指示;6.微波指示;7.真空泵指示;8.炉门指示;9.真空度指示;10.显示屏;11.微波真空干燥箱

1. Water ring pump; 2. Circulation water tank; 3. Regulating valve; 4. Observation window; 5. Power indicator; 6. Microwave indicator; 7. Vacuum pump indicator; 8. Furnace door indicator; 9. Vacuum degree; 10. Display screen; 11. Microwave vacuum drying box

图 1 微波真空干燥试验装置图

Fig.1 Schematic diagram of microwave-vacuum drying system

其他仪器:JA-MP1100B 型精密电子天平(上海精科天平有限公司);101A-5 型电热鼓风烘干箱(上海试验仪器厂有限公司)。

### 1.2 材料及预处理方法

海星于 2014 年 5 月采自大连黑石礁海域,将用柠檬酸溶液脱毒处理后的海星棘皮沥干分组,每组总质量约 $100\text{ g}$ 左右,脱毒后海星棘皮的初始湿基含水率为 $65\%$ 左右。

### 1.3 微波真空干燥试验方法

#### 1.3.1 单因素试验设计

结合参考文献<sup>[12]</sup>及本实验室已有的研究成果,脱毒海星微波真空干燥单因素试验的主要试验参数确定为微波功率密度、脉冲时间、干燥腔真空度。试验中微波功率密度选择 $3、4、5、6、7\text{ W/g}$ 共 5 个水平,脉冲时间选择 $20、30、40、60\text{ s}$ 共 4 个水平(时基周期为 $60\text{ s}$ ),真空度选择 $-0.070、-0.075、-0.080、-0.085、-0.090\text{ MPa}$ 共 5 个水平。

#### 1.3.2 响应面法优化试验设计

以单因素试验为基础,根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,选取微波功率密度、脉冲时间、真空度 3 个试验因素,以干燥平均速率、能耗和蛋白质保留率的综合评分作为响应值,通过 Design Expert 8.0.5 软件对脱毒海星微波真空干燥的工艺进行响应面分析,在此基础上得出各因素之间的最佳组合。

### 1.4 试验指标测定方法

#### 1.4.1 干燥曲线的确定

微波真空干燥试验过程中,每隔 $4\text{ min}$ 停止干燥并快速称量脱毒海星物料的质量,直至干燥至湿基含水率为 $13\%$ 终止<sup>[10]</sup>,重复 3 次,取平均值。可绘制出脱毒海星湿基含水率随干燥时间变化的干燥曲线,其中湿基含水率 $A(\text{g/g})$ 的计算方法如式(1)所示:

$$A=(m_t-m_0)/m_i \quad (1)$$

式中: $m_t$ 为干燥后物料的质量, $\text{g}$ ;  $m_0$ 为物料干基质量, $\text{g}$ 。

#### 1.4.2 干燥平均温度的测定

干燥时脱毒海星的表面温度由非接触式红外测温传感器实时监测,以试验间隔范围内的干燥开始温度和干燥结束温度的平均值来表示物料的干燥平均温度。

#### 1.4.3 干燥平均速率的测定

干燥平均速率 $V$ 是反映干燥快慢的指标,其值越大则干燥一定量物料所需的时间越短。计算方法如式(2)所示。

$$V=\Delta M/\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta M$ 为干燥至安全含水率时脱毒海星减少的湿基含水率, $\%$ ;  $\Delta T$ 为脱毒海星干燥至安全含水率所用的总时间, $\text{min}$ 。

#### 1.4.4 能耗的测定

能耗即脱除每克水所需的电能( $\text{kW}\cdot\text{h/g}$ )。

$$\text{能耗} = Q_{\text{电}}/m_{\text{水}} \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{电}}$ 为消耗电能, $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $m_{\text{水}}$ 为干燥前后物料脱水的质量, $\text{g}$ 。

#### 1.4.5 蛋白质保留率的测定

粗蛋白含量采用微量凯氏定氮法(GB/T 5009.5-2003)测定。蛋白质保留率 $Q$ 按下式计算:

$$Q=U_t/U_0\times 100\% \quad (4)$$

式中: $U_t$ 为干燥后粗蛋白质量, $\text{g}$ ;  $U_0$ 为干燥前粗蛋白质量, $\text{g}$ 。

#### 1.4.6 综合指标的测定

将干燥平均速率、能耗和蛋白质保留率 3 个指标运用隶属度的综合评分法对脱毒海星的微波真空干燥工艺进行综合评分<sup>[13]</sup>。干燥平均速率和蛋白质保留率隶属度按下式计算:

$$P_{x \text{ 或 } y}=(A_i-A_{\min})/(A_{\max}-A_{\min}) \quad (5)$$

能耗的隶属度按下式计算:

$$P_z=(A_{\max}-A_i)/(A_{\max}-A_{\min}) \quad (6)$$

式中: $A_i$ 为指标值; $A_{\min}$ 为指标最小值; $A_{\max}$ 为指标最大值。

综合分按下式计算:

$$S=aP_x+bP_y+cP_z \quad (7)$$

式中: $P_x$ 、 $P_y$ 及 $P_z$ 依次为干燥平均速率、蛋白质保留率和能耗 3 个指标的隶属度, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 依次为 3 个指标的权重,本文考虑以蛋白质保留率为主要指标,干燥平均速率和能耗为次要指标,于是取 $a=0.25$ , $b=0.5$ , $c=0.25$ 。以上指标的试验重复 3 次,测量结果取平均值。

## 1.5 数据处理方法

采用 Design Expert 8.0.5 软件对脱毒海星微波真空干燥综合评分的试验结果进行回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 微波真空干燥参数对脱毒海星干燥特性的影响

不同微波功率密度、脉冲时间和真空度对微波真空干燥时脱毒海星的干燥特性的影响见图 2 及图 3。

由图 2a 及图 3 可知, 在脉冲时间及真空度条件相同的情况下, 随着微波功率密度的增大, 脱毒海星干燥过程中干燥时间缩短, 干燥平均温度与干燥平均速率均随之增大。当微波功率密度从 3 W/g 提高到 7 W/g 时, 干燥至干燥终点所需时间由 26 min 缩短至 11 min, 干燥平均温度由 43℃ 提高至 48℃, 干燥平均速率由 1.99%/min 提高至 4.87%/min, 提高了 2.44 倍。这是由于微波功率密度

越大, 脱毒海星中单位水分吸收微波能越多, 微波能转化为热能越多, 从而使得温度升高, 而温度的升高促进了水蒸气的迁移, 从而提高了干燥平均速率并缩短了干燥时间。这与张黎骅对银杏果、朱德泉等对小麦、陈风杰对低值小带鱼进行微波真空干燥时得出的结论相同<sup>[14-16]</sup>。

由图 2b 及图 3 可知, 当微波功率密度、真空度等条件一定时, 随着脉冲时间的增加, 干燥至最终含水率所需时间缩短, 干燥平均温度和干燥平均速率均增大。如当脉冲时间分别为 20、40 及 60 s 时, 干燥至最终含水率所需时间分别为 21、19 及 18 min, 干燥平均温度分别为 39、41 及 43℃, 干燥平均速率分别为 2.51、2.80 及 2.95%/min。这是由于随着脉冲时间的延长, 物料在每个工作周期内微波加热时间延长, 获得的微波能量增加, 造成脱毒海星表面干燥平均温度提高, 使水分向外扩散蒸发的速度提高, 从而提高了干燥平均速率并缩短了干燥至最终含水率所需时间。

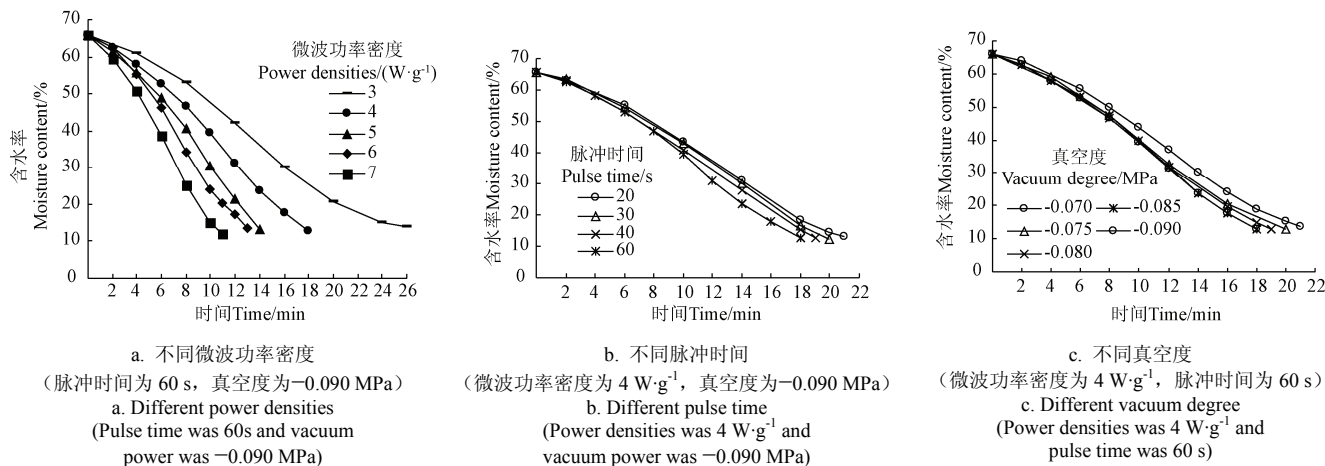


图 2 脱毒海星微波真空干燥曲线

Fig.2 Drying curves of detoxified starfish during microwave vacuum drying

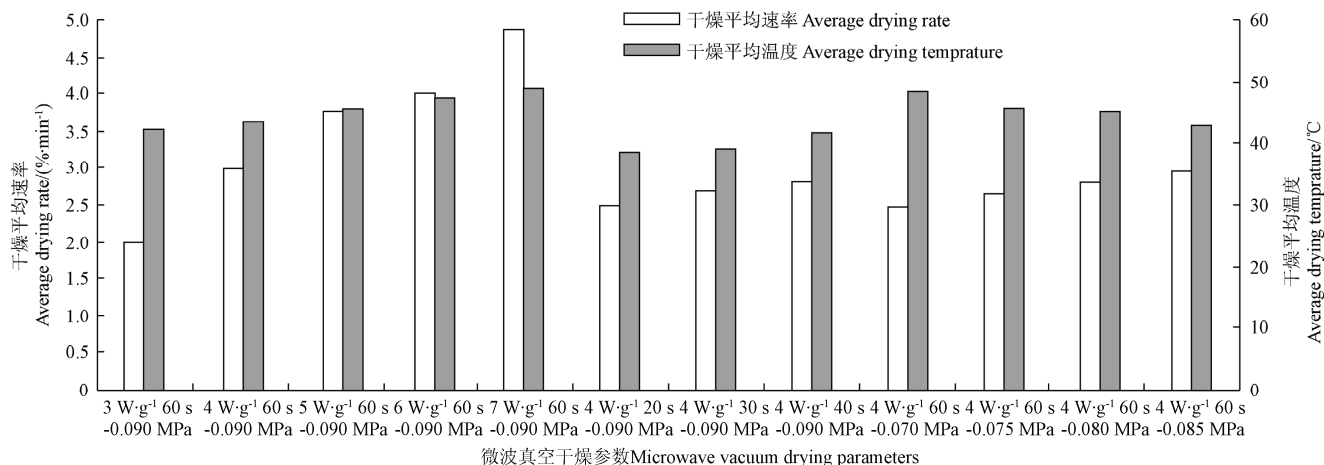


图 3 物料表面干燥平均温度和干燥平均速率变化图

Fig.3 Average temperature of sample surface and average drying rate during microwave vacuum drying

由图 2c 及图 3 可知, 在微波功率密度、脉冲时间条件相同的情况下随着干燥腔负压的增大, 脱毒海星微波真空干燥过程中干燥至最终含水率所需时间缩短, 干燥平均温度降低, 干燥平均速率随之提高。如图 2c 所

示, 当负压由 -0.070 MPa 增大至 -0.090 MPa 时, 将海星干燥至最终含水率所需时间由 21 min 降为 18 min, 而干燥平均温度由 48℃ 降低至 43℃。这主要是由于水分的蒸发温度与真空度呈反比, 因此当负压较高时, 水

分蒸发温度较低,干燥平均温度较低<sup>[17]</sup>;另由图 3 可知,干燥平均速率与真空度呈正比,且当负压较小时,提高真空度对干燥速率变化的影响较大,而当真空度达到-0.080 MPa 以上时,干燥平均速率受真空度的影响明显减小。例如当负压由-0.070 MPa 升至-0.080 MPa 时,干燥平均速率由 2.48%/min 提高至 2.80%/min,提高了 12.89%;而当负压由-0.080 MPa 升至-0.090 MPa 时,干燥平均速率由 2.80%/min 提高至 2.95%/min,仅提高了 5.55%。这是由于当负压提高至一定程度时,水

分的汽化和蒸发温度降低,汽化潜热增加,导致水分蒸发所耗热能变化不大,因此负压的提高对干燥平均速率的影响不明显,通过提高负压来提高干燥平均速率是有一定限度的<sup>[18-20]</sup>。

2.1.2 微波真空干燥参数对脱毒海星干燥能耗和蛋白质保留率的影响

脱毒海星在不同微波功率密度、脉冲时间和真空度条件下进行微波真空干燥时的能耗和蛋白质保留率如图 4 所示。

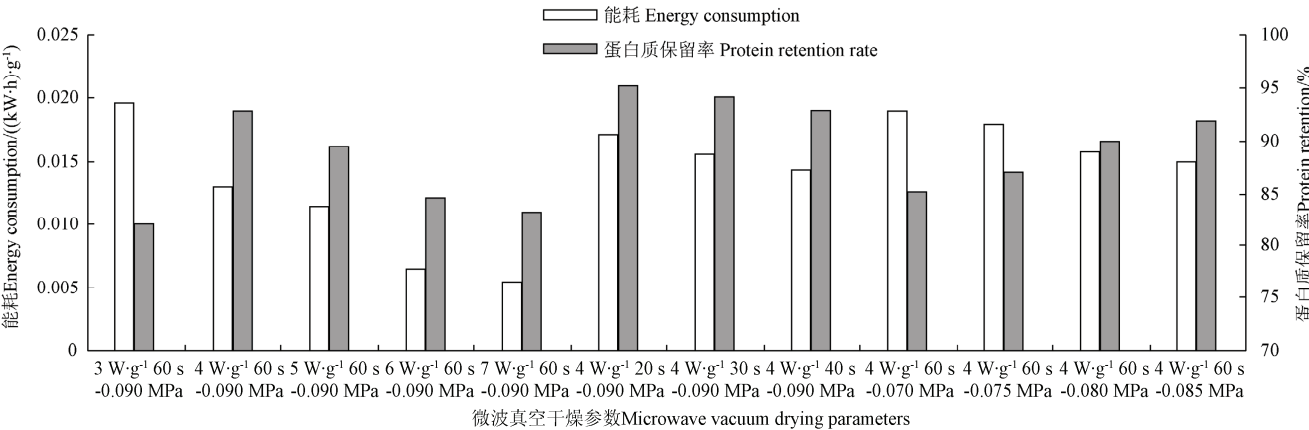


图 4 脱毒海星微波干燥过程中的能耗和蛋白质保留率变化图  
Fig.4 Energy consumption and protein retention rate of detoxified starfish during microwave vacuum drying

由图 4 可见,从总体趋势上看,随着微波功率密度的增大,脱毒海星微波干燥的能耗逐渐下降,蛋白质保留率先提高后逐渐减小。如当微波功率密度为 3 W/g 提高至 7 W/g 时,能耗由 0.0197 kW·h/g 降低至 0.0054 kW·h/g,下降了 72.37%。这是由于微波功率密度增大,干燥平均速率增大,干燥时间缩短,从而使能耗降低<sup>[14]</sup>。但干燥功率过高,会发生能量并未被全部用于物料干燥的现象,部分能量被浪费<sup>[21]</sup>;当微波功率密度由 3 W/g 提高至 4 W/g 时,蛋白质保留率由 81.81%提高至 92.77%,这是由于微波功率密度为 3 和 4 W/g 时平均干燥温度分别为 42℃和 43℃,仅相差 1℃,而当温度相近时,蛋白质的保留率与干燥时间成反比<sup>[22]</sup>,与微波功率密度为 3 W/g 相比,微波功率密度为 4 W/g 时干燥至终点少用 8 min,因此蛋白质的保留率有所升高。当微波功率密度由 4 W/g 继续提高至 7 W/g 时,蛋白质保留率由 92.77%降低至 83.06%,这是因为此时脱毒海星的微波真空干燥的干燥平均温度由 43℃升高至 48℃,正处于蛋白质的变性温度范围内,温度提高对变性反应速度影响显著<sup>[23]</sup>,且较高的温度可使脂类、多糖的化学反应产物与蛋白质发生二次反应,进一步降低蛋白质保留率。

由图 4 可知,随着脉冲时间的延长,脱毒海星微波干燥的能耗和蛋白质保留率均呈现下降趋势。如当脉冲时间由 20 s 提高至 60 s 时,脱毒海星微波干燥的能耗由 0.0173 kW·h/g 降低至 0.0130 kW·h/g,蛋白质保留率由 95.18%降低至 92.77%。这是因为当脉冲时间由 20 s 提高至 60 s 时,干燥至最终含水率所需时间由 21 min 缩短至 18 min,从而减少能量消耗,这与田玉庭等得出的结论相

同<sup>[24]</sup>;又由于干燥平均温度由 39℃升高至 43℃,提高了蛋白质的变性反应,因此蛋白质保留率降低。

由图 4 可知,随着负压的提高,脱毒海星微波干燥的能耗和蛋白质保留率分别呈现下降和上升趋势。如当负压由-0.070 MPa 提高至-0.090 MPa 时,脱毒海星微波干燥的能耗由 0.0190 kW·h/g 降低至 0.0130 kW·h/g,蛋白质保留率由 85.02%提高至 92.77%。这是因为干燥时间由 21 min 缩短至 18 min 且干燥平均温度由 48℃降低至 43℃,有利于减少能量消耗和保留蛋白质。

综合分析上述试验结果,微波功率密度、脉冲时间及真空度分别选择在 4~6 W/g、30~60 s 和-0.080~-0.090 MPa 范围内时可获得较好的干燥效果。

2.2 响应面法优化干燥条件

根据单因素试验结果,选取微波功率密度、脉冲时间及真空度进行三因素三水平响应面试验,试验设计见表 1,共有 17 个试验点,其中 12 个析因点,5 个中心点,试验结果见表 2。

| 表 1 响应面试验因素水平表   |           |        |        |
|--|-----------|--------|--------|
| Table 1 Factors and levels of RAS test                   |           |        |        |
| 因素<br>Factors  | 水平 Levels |        |        |
|  | -1        | 0      | 1      |
| 微波功率密度<br>Microwave power density A/(W·g <sup>-1</sup> ) | 4         | 5      | 6      |
| 脉冲时间<br>Pulse time B/s                                   | 30        | 45     | 60     |
| 真空度<br>Vacuum degree C/MPa                               | -0.080    | -0.085 | -0.090 |

运用 Design Expert 8.0.5 软件对脱毒海星微波真空干



燥综合评分的试验结果进行回归分析，二次回归方程见式（8）。

$$S=0.51-0.11A+0.080B+0.017C-0.047AB-0.013AC+0.033BC-0.048A^2-0.024B^2+0.023C^2$$
（8）

式中：S 为综合评分；A 为微波功率密度，W/g；B 为脉冲时间，s；C 为真空度，MPa。

表 2 响应面试验设计及试验结果  
Table 2 Program and results of RSA test

| 试验号<br>Number | 微波功率密度<br>Microwave power density | 脉冲时间<br>Pulse time | 真空度<br>Vacuum degree | 综合评分<br>Comprehensive score |
|---------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1             | 0                                 | 0                  | 0                    | 0.509                       |
| 2             | -1                                | -1                 | 0                    | 0.387                       |
| 3             | 0                                 | 0                  | 0                    | 0.499                       |
| 4             | 0                                 | 0                  | 0                    | 0.455                       |
| 5             | 0                                 | 1                  | 1                    | 0.620                       |
| 6             | 0                                 | 0                  | 0                    | 0.477                       |
| 7             | 0                                 | -1                 | -1                   | 0.458                       |
| 8             | 0                                 | 1                  | -1                   | 0.548                       |
| 9             | 0                                 | 0                  | 0                    | 0.479                       |
| 10            | 0                                 | -1                 | 1                    | 0.387                       |
| 11            | -1                                | 0                  | 1                    | 0.605                       |
| 12            | 1                                 | 0                  | -1                   | 0.330                       |
| 13            | 1                                 | 1                  | 0                    | 0.380                       |
| 14            | 1                                 | -1                 | 0                    | 0.320                       |
| 15            | 1                                 | 0                  | 1                    | 0.361                       |
| 16            | -1                                | 0                  | -1                   | 0.524                       |
| 17            | -1                                | 1                  | 0                    | 0.661                       |

模型（8）中因素方差分析见表 3。

表 3 综合评分回归分析结果

| Table 3 Results of comprehensive score regression analysis |                |                |                |                    |
|--|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| 方差来源<br>Variance source                                    | 自由度<br>Freedom | F 值<br>F Value | P 值<br>P Value | 显著性<br>Significant |
| Model  | 9              | 12.7635        | 0.0014         | **                 |
| A  | 1              | 63.2754        | <0.0001        | **                 |
| B  | 1              | 37.6026        | 0.0005         | **                 |
| C  | 1              | 1.6662         | 0.2378         |                    |
| AB   | 1              | 6.8860         | 0.0342         | *                  |
| AC   | 1              | 0.4674         | 0.5162         |                    |
| BC   | 1              | 3.4737         | 0.1046         |                    |
| A <sup>2</sup>   | 1              | 7.1447         | 0.0319         | *                  |
| B <sup>2</sup>   | 1              | 1.3851         | 0.2777         |                    |
| C <sup>2</sup>   | 1              | 1.6516         | 0.2396         |                    |
| 残差 Residual error  | 7              |                |                |                    |
| 失拟项 Lack of fit  | 3              | 4.0968         | 0.1033         |                    |
| 纯误差 Pure error   | 4              |                |                |                    |
| 总和 Sum   | 16             |                |                |                    |

注：\*为显著（P<0.05），\*\*为极显著（P<0.01）。  
Note: \* was significant（P<0.05），\*\*was extremely significant（P<0.01）。

对脱毒海星微波真空干燥过程中各因素进行方差分析，从表 3 可见，模型的 P=0.0014<0.01，说明回归方程是极显著的，可作为预测各因素对脱毒海星微波真空干燥的模型；失拟项 P=0.1033>0.05，复相关系数 R=0.9426，

说明该模型拟合程度较好。

由表 3 回归模型系数显著性检验结果可知，对脱毒海星微波真空干燥综合评分的影响依次为微波功率密度>脉冲时间>真空度，其中微波功率密度、脉冲时间对脱毒海星微波真空干燥的综合评分有极显著性影响（P<0.01），微波功率密度的二次项及微波功率密度与脉冲时间的交互作用有显著影响（P<0.05），微波功率密度对综合评分的影响最显著。

真空度为-0.085 MPa 时微波功率密度和脉冲时间对综合评分的影响见图 5。

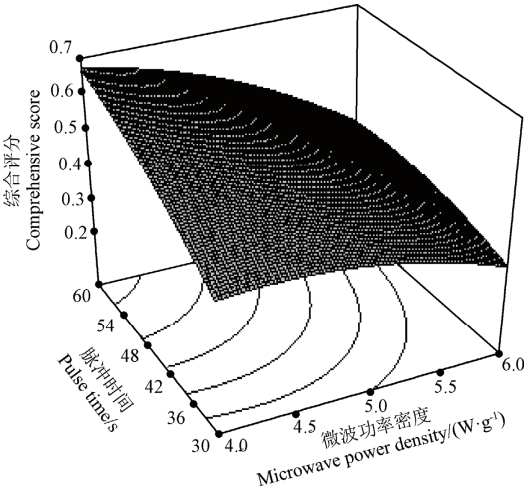


图 5 真空度为-0.085 MPa 时微波功率密度和脉冲时间对综合评分的影响

Fig.5 Effects of microwave power and pulse time on comprehensive score with vacuum power of -0.085 MPa

由图 5 可知，当脉冲时间为 30~33 s 时，综合评分随着微波功率密度的增大先增大后减小；当脉冲时间大于 33 s 时，综合评分随着微波功率密度的增大而减小。并且随着脉冲时间的增加，这种变化越来越大，这说明微波功率密度 A 与脉冲时间 B 的交互作用显著。

利用回归方程式（8）预测脱毒海星的微波真空干燥的最佳条件为微波功率密度为 4 W/g，脉冲时间为 60 s，真空度为-0.090 MPa，在此条件下脱毒海星微波真空干燥的综合评分可达 0.757。在此条件下进行 3 次平行试验，测得脱毒海星微波真空干燥的干燥平均速率为 2.95%/min，能耗为 0.0118 (kW·h)/g，蛋白质保留率为 93.80%，综合评分为 0.751，与预测值绝对误差仅为 0.8%。试验值与预测值吻合好，证明了该模型的合理可靠性。

2.3 成本分析及应用前景

采用本文研究的微波真空干燥工艺干燥 1 kg 脱毒海星比目前采用的热风干燥工艺可以节省电 8 kW·h，按电价 0.5 元/(kW·h)计算，可以降低脱毒海星干燥成本 4 元，而且干燥平均速率高，干燥后的脱毒海星蛋白质保留率较高，品质较好，是一种快速、节能的干燥工艺，研究结果为脱毒海星干燥的工业化生产提供了一定参考，在脱毒海星资源化利用为蛋白质饲料资源的生产中具有广泛的应用前景。

### 3 结 论

1) 单因素试验结果表明, 脱毒海星的微波真空干燥过程中, 在 3~7 W/g、20~60 s 和 -0.070~-0.090 MPa 范围内, 微波功率密度越大, 脉冲时间越长, 真空度越高, 干燥平均速率越高; 提高微波功率密度、脉冲时间和提高负压, 能耗均降低; 增大微波功率密度和延长脉冲时间, 脱毒海星的蛋白质保留率分别呈现出先提高后减小和逐渐下降的趋势, 提高负压脱毒海星的蛋白质保留率提高。当微波功率密度、脉冲时间和真空度分别控制在 4~6 W/g、30~60 s 和 -0.080~-0.090 MPa 时, 有利于脱毒海星干燥和蛋白质的保留。

2) 响应面优化试验结果发现, 对脱毒海星微波真空干燥综合评分的影响依次为微波功率密度>脉冲时间>真空度, 且微波功率密度和脉冲时间有较显著的交互作用。脱毒海星的微波真空干燥的最佳条件为微波功率密度为 4 W/g、脉冲时间为 60 s、真空度为 -0.090 MPa, 在此条件下脱毒海星微波真空干燥的综合评分为 0.751。回归模型拟合度较好, 对脱毒海星微波真空干燥工艺有较好的指导作用。

3) 成本分析可知, 微波真空干燥工艺干燥 1 kg 脱毒海星比目前采用的热风干燥工艺可以降低干燥成本 4 元, 并可获得品质较高的产品, 本研究可为脱毒海星资源化利用为蛋白质饲料的工业化生产提供技术依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 金鼎, 周东荣, 邹民发, 等. 脱毒海星粉饲喂生长肥育猪效果试验[J]. 养猪, 1999(1): 5-6.  
Jin Ding, Zhou Dongrong, Zhou Minfa, et al. The test of growth finishing pig fed by detoxicated starfish powder[J]. pig farming, 1999(1): 5-6. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐均望. 海星饵料: 中国专利, 02101962.2[P], 1997-05-10.  
Xu Junwang. Starfish bait: China Patent, 02101962.2[P], 1997-05-10.
- [3] 徐均望, 路璧和, 宋志乐, 等. 海星棘皮用作饵料添加成分养牙鲆的研究[J]. 烟台大学学报, 2002, 15(3): 211-215.  
Xu Junwang, Lu Bihe, Song Zhile, et al. Asterias echino-skin used as additive component of the feed for olive flounder culture[J]. Journal of Yantai University, 2002, 15(3): 211-215. (in Chinese with English abstract)
- [4] 滕瑜, 李娟, 王彩理. 海星类营养和加工利用简述[J]. 科学养鱼, 2012: 75-76.  
Teng Yu, Li Jun, Wang Caili. The nutrition and processing utilization of starfish[J]. Scientific fish, 2012: 75-76. (in Chinese with English abstract)
- [5] Mansell R, Suite B, Roswell G A. Engineering a "fish-dry"[J]. Food Engineering, 2002: 11-30.
- [6] 孙伟, 穆晓凯, 孙清超, 等. 微波干燥对蒿草茎秆力学性能的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 277-282.  
Sun Wei, Mu Xiaokai, Sun Qingchao, et al. Effects of microwave drying on mechanical properties of wormwood stem[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 277-282. (in Chinese with English abstract)
- [7] Sumnu G A. Review on microwave baking of foods[J]. International journal of food science and technology, 2001, 36(2): 117-127.
- [8] Lin T M, Timothy D D, Seaman C H. Physical and sensory properties of vacuum microwave dehydrated shrimp[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 1999, 8(4): 41-53.
- [9] 关志强, 郑立静, 李敏, 等. 罗非鱼片热泵-微波联合干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 270-275.  
Guan Zhiqiang, Zheng Lijing, Li Min, et al. Combined drying technology of tilapia fillets using heat pump and microwave[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 270-275. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张国琛, 母刚, 张倩, 等. 微波真空干燥对虾的试验研究[J]. 农业工程, 2012, 2(4): 25-28.  
Zhang Guochen, Mu Gang, Zhang Qian, et al. Study on microwave vacuum dried shrimps[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(4): 25-28. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张倩, 张国琛, 母刚, 等. 微波真空干燥对虾夷扇贝闭壳肌营养成分的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(6): 604-609.  
Zhang Qian, Zhang Guochen, Mu Gang, et al. Effects of microwave vacuum drying on the nutritional quality of scallop adductor muscle[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(6): 604-609. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张国琛. 扇贝柱微波真空干燥机理及品质[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.  
Zhang Guochen. Studies on the vacuum- microwave drying of scallop[D]. BeiJing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张黎骅, 张文, 吕珍珍. 响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 369-374.  
Zhang Lihua, Zhang Wen, Lü Zhenzhen. Optimization of intermittent microwave drying technology for lees by response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 369-374. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张黎骅, 刘波, 刘涛涛. 银杏果微波间歇干燥工艺的优化[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 108-114.  
Zhang Liye, Liu Bo, Liu Taotao. Optimization of intermittent microwave drying of ginkgo fruits[J]. Food Science, 2014, 35(2): 108-114. (in Chinese with English abstract)
- [15] 朱德泉, 王继先, 朱德文, 等. 小麦微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 182-185.  
Zhu Dequan, Wang Jixian, Zhu Dewen, et al. Experimental study on wheat grain microwave drying characteristics and its effect on the quality of wheat grain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(4): 182-185. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈凤杰. 以低值小带鱼为原料的重组鱼脆粒加工及贮藏研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.  
Chen Fengjie. Study on processing and storage of re-structured fish crisp granule using low-value small hairtail as material[D]. Wu Xi: Southern Yangtze University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈健凯, 林河通, 林艺芬, 等. 基于品质和能耗的杏鲍菇微波真空干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 277-284.  
Chen Jiankai, Lin Hetong, Lin Yifen, et al. Optimized technology of Pleurotus eryngii by microwave-vacuum drying based on quality and energy consumption[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 277-284. (in Chinese with English abstract)

- [18] 黄建立. 银耳微波真空干燥机理及品质特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.  
Huang Jianli. Study on the microwave vacuum drying mechanism and quality characteristics of white fungus[D]. Fu Zhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 362—367.  
Huang Yan, Huang Jianli, Zheng Baodong. Microwave vacuum drying properties and kinetics model of white fungus[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 362—367. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李维新, 魏巍, 何志刚. 糖姜间歇微波真空干燥特性及其动力学模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 262—266.  
Li Weixin, Wei Wei, He Zhigang, et al. Intermittent microwave vacuum drying characteristics and dynamics model of sugar ginger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 262—266. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱德泉, 王继先, 朱德文. 香菜微波干燥的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 242—246.  
Zhu Dequan, Wang Jixian, Zhu Dewen, et al. Experimental study on microwave drying of coriander[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(12): 242—246. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张倩. 虾夷扇贝闭壳肌的微波真空干燥试验研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2013.  
Zhang Qian. Experimental study on microwave vacuum drying of scallop adductor muscle[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [23] 阙建全. 食品化学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 68—166.
- [24] 田玉庭, 陈洁, 庄培蓉, 等. 响应面法优化龙眼肉微波真空干燥工艺[J]. 热带作物学报, 2011, 32(12): 2352—2357.  
Tian Yuting, Chen Jie, Zhuang Peirong, et al. Optimization of microwave vacuum drying of longan pulp by response surface methodology[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(12): 2352—2357. (in Chinese with English abstract)

## Optimization of microwave-vacuum drying for detoxified starfish

Zhang Guochen, Li Sha, Zhang Qian, Li Xiuchen, Mu Chunfa

(R&D Center of Fisheries Equipment and Engineering of Liaoning Province, College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Starfish is widely distributed in inshore aquaculture zones in China and it is the predator for many aquaculture animals such as oyster, scallop and abalone. Since starfish has strong fecundity and regenerative capacity, the number of starfish has been growing in recent years with the development of inshore aquaculture. The annual yield of starfish has reached 50 000 tons in Dalian, which seriously imperils the development of aquaculture industry. Starfish is rich in nutrients such as protein and polysaccharide, but it contains some toxic substances (such as saponin) as well. It is accordingly a potential resource for feed processing industries after being detoxified. The drying of detoxified starfish has been paid more attention because the traditional drying methods are inefficient and hardly for product quality controlling. In this paper, microwave-vacuum drying of detoxified starfish was carried out and the drying rate, product quality and energy consumption were evaluated. The influences of microwave power density (3-7 W/g), pulse time (20-60 s) and relative vacuum degree (between -0.070 and -0.090 MPa) on the drying characteristics, energy consumption and protein retention rate were firstly studied by single-variable experiments. Results showed that when the microwave power density increased from 4 to 7 W/g, the drying time reduced from 18 to 11 min, the average drying rate increased from 2.95%/min to 4.87%/min, and the energy consumption decreased from 0.0130 to 0.0054 kW·h/g, but the protein retention rate dropped to 83.06% from 92.77%; meanwhile, when drying under the pulse time of 60 s, the average drying rate, energy consumption and protein retention rate would be respectively 1.17 times, 75.16% and 97.47% of that when drying under 20 s pulse time. Similarly, drying under -0.090 MPa relative vacuum degree, the average drying rate, energy consumption and protein retention rate were 1.19 times, 68.41% and 1.09 times of that drying under -0.070 MPa, respectively. It would be more favorite by controlling the microwave power density, pulse time and relative vacuum degree respectively within 4-7 W/g, 30-60 s and -0.080--0.090 MPa. In addition, the response surface methodology (RSM) was employed for the multi-variable experiments, and the regression model was accordingly established. Results of RSM experiments demonstrated that the drying process of detoxified starfish was significantly influenced by microwave power density, followed by pulse time and relative vacuum degree. The microwave power density and the pulse time had significant effect on the comprehensive score ( $P<0.01$ ). An interaction worked between the microwave power density and the pulse time on comprehensive score ( $P<0.05$ ). The average drying rate of starfish, energy consumption, protein retention rate and comprehensive score would be 2.95%/min, 0.0118 kW·h/g, 93.80% and 0.751, respectively, under the drying conditions of 4 W/g microwave power density, 60 s pulse time and -0.090 MPa relative vacuum degree. Under this condition, the energy consumption of 1 kg detoxified starfish dried with microwave vacuum drying method could be saved by 8 kW·h compared to hot air drying and the drying cost of starfish could reduce by 4 RMB. Meanwhile, a higher protein retention rate and good quality of the dried detoxified starfish could be obtained by microwave vacuum drying. Microwave-vacuum drying is an effective method for detoxified starfish processing and it is a promising approach for the industrial utilization of starfish.

**Key words:** drying; models; optimization; detoxified starfish; energy consumption; protein retention rate