

# 响应面法优化热泵-热风联合干燥小黄鱼 (*Pseudosciaena polyactis*)的节能参数\*

孙媛 谢超 何韩炼

(浙江海洋学院食品与医药学院 舟山 316000)

**提要** 为了减少小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)干燥过程的能耗,在前期实验的基础上,采用响应面分析法,以单位能耗除湿值(SMER)和挥发性盐基总氮值(T-VBN)两者的综合指标  $Y$  为最终评价指标,对热泵干燥阶段的温度  $A$ 、分阶段干燥的转换点含水率  $B$ 、后期热风干燥阶段的温度  $C$  三个条件进行优化,模拟得到回归方程的预估模型。结果表明,小黄鱼联合干燥的最优条件为热泵干燥温度  $A=50^{\circ}\text{C}$ 、转换点含水率  $B=32.62\%$ 和热风干燥温度  $C=44.01^{\circ}\text{C}$ ,在此条件下比较热泵干燥(HPD)、热泵-热风联合干燥(HPD+AD)、热风干燥(AD)三种干燥方式下的样品品质和耗能,联合干燥得到的小黄鱼干品质高于热风干燥,而且干燥能耗降低了 34.8%。

**关键词** 小黄鱼;联合干燥;工艺优化;响应面分析

**中图分类号** TS254.1

小黄鱼为我国主要经济鱼类之一,主要分布在渤海、黄海和东海。浙江沿海一带有丰富的小黄鱼资源(徐兆礼等, 2009)。其含有丰富的蛋白质、矿物质和维生素,对人体有很好的补益作用,对体质虚弱和中老年人来说,食用小黄鱼会收到很好的食疗效果。小黄鱼还含有丰富的微量元素硒,能清除人体代谢产生的自由基,能延缓衰老,并对各种癌症有防治功效。其肉质鲜嫩,营养丰富,是优质食用鱼(Eastone, 1957)。

干燥是食品最重要的保存方法之一(Zdzisaw *et al*, 1986; 张懋等, 2006)。小黄鱼脂肪中的不饱和脂肪酸含量较高,在温度高的环境下容易氧化(Watanabe, 1982)。传统的干燥方式所需温度比较高,使脂肪的氧化程度较高(Hepbash *et al*, 2010)。低温干燥方法可避免脂肪过度氧化,这是防止大黄鱼加工过程中氧化腐败的有效方法。国内对低温干燥设备已有研究(叶盛英等, 1999; 李志远等, 1999; 徐建国等, 2008)。而热泵-热风联合干燥在小黄鱼干燥的工艺优化方面的

应用尚无报道(张国琛等, 2004)。

联合干燥技术相对较节能,同时还可以提高产品的质量,适用于水产品干燥(杜克镛等, 2005; Filiz *et al*, 2010)。由于该组合干燥前期温度低,可以缓解鱼干表面发生结壳,这样小黄鱼内部的水分转移到表面就会比较容易,因此产品含水量低、质量好(Carrington *et al*, 1996; Chou *et al*, 2001)。本文采用热泵-热风联合的低温干燥方法研究不同干燥温度和转换点含水率的交互作用对小黄鱼品质和干燥能耗的影响,探索小黄鱼的最佳干燥条件。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

每尾体重 150g 左右小黄鱼,购于舟山农贸市场,经预处理后备用。营养琼脂、甲基红(分析纯)、亚甲基蓝、氢氧化钠等均由国药集团化学试剂有限公司提供。

### 1.2 仪器与设备

热泵-热风干燥一体机(杭州易德有限公司);电

\* 浙江省重大科技项目, 2012C11015-2 号; 浙江省公益项目, 2012C21068 号, 2012C33084 号; 浙江省自然科学基金项目, LY13C200005 号; 舟山市科技项目, 2012C21018 号。孙媛, 硕士研究生, E-mail: 18368086276@139.com

通讯作者: 谢超, 副教授, E-mail: xc750205@163.com

收稿日期: 2013-04-23, 收修改稿日期: 2013-07-16

热恒温鼓风干燥箱(宁波奥博有限公司)。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 干制品含水率确定** 采用 105℃ 烘干恒重法(GB/T 5009)。干燥第一阶段先每隔 1h 测定小黄鱼的含水率, 在小黄鱼干含水率接近预设转换点(30℃、35℃、40℃)的时候每隔 6min 测定一次, 干燥第二阶段先每隔半小时测一次, 当含水率接近 20%左右每隔 6min 测定一次, 最终获得 20%左右含水率的小黄鱼干产品。

**1.3.2 挥发性盐基总氮测定** 挥发性盐基总氮(T-VBN)是衡量产品新鲜或腐败程度的重要指标(骆和东等, 2003)。本文采用微量扩散法检测(宁正祥, 1998)。取待测鱼肉 10g, 研碎并搅拌均匀后用蒸馏水定容至 100mL, 从中取 30mL 用滤纸过滤后提取液待用。在康维皿中央内室加入 1mL 吸收液(2%硼酸)和 1 滴甲基红-亚甲基蓝混合指示剂, 皿外室一侧加 1mL 上述提取液, 另一侧加入 1mL 饱和 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液, 立即盖好混匀, 然后放置在 37℃ 培养箱中 2h, 最后用 0.0100mol/L 的盐酸标准滴定液滴定至呈蓝紫色。每组样品做 3 个平行, 同时做空白试验。

**1.3.3 干制品单位能耗除湿量的测定** 单位能耗除湿量(SMER)的计算方法采用如下公式计算:

$$SMER = M/W_n \text{ [kg H}_2\text{O/(kW}\cdot\text{h)]}$$

式中,  $M$  为水分蒸发量,  $W_n$  为干燥阶段所消耗的总能量, 可由电表读数计算。

**1.3.4 综合指标** 热泵-热风联合干燥工艺过程主要从干燥能耗及干燥产品的品质两方面来评定。挥发性盐基总氮(T-VBN)是衡量产品新鲜或腐败程度的重要指标, 因此本研究将挥发性盐基总氮作为评价小黄鱼干品质的主要指标, 评价干燥能耗用 SMER 值来衡量, 故取两者作为响应面优化试验的综合评定指标。T-VBN 值越小, 产品品质越好, SEMR 值越大干燥能耗越低。综合评定值取权重系数与两个指标试验测试值的隶属函数值。先采用线性型功效系数法进行规范化, 再用线性加权法构造评价函数, 平衡各指标的量级和量纲。因认为两个指标的分量同样重要, 所以通过评价法确定权重系数时, 采取平权处理, 即  $a_1=0.5, a_2=0.5$  (任爱清, 2009)。评价函数为:

$$Y_i = a_1 \times \left( \frac{Y_{1i} - Y_{1\min}}{Y_{1\max} - Y_{1\min}} \right) + a_2 \times \left[ 1 - \left( \frac{Y_{2i} - Y_{2\min}}{Y_{2\max} - Y_{2\min}} \right) \right]$$

**1.3.5 响应面优化** 为了得到热泵和热风最佳的联合干燥工艺, 本研究采用响应面法对该工艺进行

优化分析(李蕾等, 2009)。根据 Box-Behnken 模型的中心组合试验设计原理(费荣昌, 2001; 王钦德等, 2003), 以热泵干燥阶段温度、分阶段干燥的水分转换点、后期热风干燥阶段温度为影响因素, 以单位能耗除湿值(SMER)和挥发性盐基总氮(T-VBN)两者的综合指标  $Y$  为最终评价指标, 利用 design-expert 7.0 软件对实验数据进行分析。

根据前期单因素实验, 本实验干燥条件为: 大小 150g 左右的小黄鱼、干燥室温度为 50℃、循环风速为 2.0m/s、装填的物料量为 10kg、干燥室相对湿度控制在 30%。应用 design-expert 7.0 软件进行数据分析处理, 找出较优的操作条件。各因素水平编码值见表 1。

表 1 响应面试验的因素和水平  
Tab. 1 Factors and levers of response surface test

水平	因素		
	A[热泵温度(℃)]	B[转换点含水率(%)]	C[热风温度(℃)]
-1	40	30	30
0	45	35	40
+1	50	40	50

## 2 结果与讨论

### 2.1 响应面分析

响应面分析方案及结果见表 2。总共 15 个实验, 其中 12 个为析因实验, 3 个为中心实验, 以估计实验误差。

以小黄鱼干燥 SMER 值和干制品的 T-VBN 值两者的综合指标为评价指标, 选热泵干燥温度、转换点含水率、热风干燥温度三个因素为自变量, 利用 design-expert 7.0 软件对实验数据进行分析。通过对每个因素进行回归拟合后, 得到综合指标  $Y$  的方程为: 综合指标  $Y = 0.56 + 0.028A - 0.030B + 0.025C - 0.021AB - 0.019AC - 0.026BC - 0.027A^2 - 0.065B^2 - 0.023C^2$ 。

由表 3 可知, 回归模型具有高度显著性( $P < 0.01$ ), 失拟误差并不显著( $P > 0.05$ ), 回归模型的相关系数平方  $R^2 = 0.9953$ , 具有较高的总决定系数; 同时 CV 值越低, 显示实验稳定性越好, 本实验中 CV 值为 1.15, 说明实验操作可信。这说明二次回归方程与试验结果具有较好的拟合度, 说明综合评定指标与全体自变量之间的关系高度显著, 且误差项较小, 可以较好的预测各参数与综合指数  $Y$  之间的关系。由模型分析可知因素 A、B、C 对实验均有很大的影响。

表 2 响应面分析方案及结果  
Tab. 2 Scheme and results of response surface analysis

实验号	A	B	C	SMER[kgH <sub>2</sub> O/(kW·h)]	T-VBN(mg/100g)	综合指标 Y
1	-1	-1	0	0.6528	84.17	0.4499
2	-1	1	0	0.6316	83.19	0.4289
3	1	-1	0	0.5475	65.66	0.5456
4	1	1	0	0.5372	71.84	0.4397
5	0	-1	-1	0.5295	70.47	0.4452
6	0	-1	1	0.6925	81.73	0.5518
7	0	1	-1	0.5201	69.79	0.4395
8	0	1	1	0.7860	99.77	0.4431
9	-1	0	-1	0.5400	72.26	0.4364
10	1	0	-1	0.8201	97.51	0.5331
11	-1	0	1	0.7610	91.65	0.5205
12	1	0	1	0.8101	95.82	0.5412
13	0	0	0	0.7524	87.93	0.5607
14	0	0	0	0.7528	88.01	0.5602
15	0	0	0	0.7401	86.55	0.5604

表 3 回归模型方差分析  
Tab. 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.049	9	5.498E-003	165.10	< 0.0001
A	6.266E-003	1	6.266E-003	188.18	< 0.0001
B	7.278E-003	1	7.278E-003	218.57	< 0.0001
C	5.121E-003	1	5.121E-003	153.78	< 0.0001
AB	1.802E-003	1	1.802E-003	54.12	0.0002
AC	1.444E-003	1	1.444E-003	43.36	0.0003
BC	2.652E-003	1	2.652E-003	79.65	< 0.0001
A <sup>2</sup>	3.048E-003	1	3.048E-003	91.55	< 0.0001
B <sup>2</sup>	0.018	1	0.018	531.07	< 0.0001
C <sup>2</sup>	2.234E-003	1	2.234E-003	67.08	< 0.0001
残差	2.331E-004	7	3.330E-005		
失拟误差	7.488E-005	3	2.496E-005	0.63	0.6325
纯误差	1.582E-004	4	3.955E-005		
总和	0.050	16			
总回归的相关性系数(R <sup>2</sup> )	0.9953				

## 2.2 最佳联合干燥条件的确定

研究每个因素对综合指标的影响, 并作出响应面图, 对小黄鱼干燥条件进行优化。利用响应面软件处理得到的响应面图见图 1(a)、图 2(a)、图 3(a), 等高线图见图 1(b)、图 2(b)、图 3(b)。可以评价各因素之间的相互作用强度, 以及确定最佳的工艺参数。

图 1、图 2、图 3 直观地反映了各个因素之间的相互作用对响应值的影响, 由等值线图可以看出存在极值的条件应在圆心处。由响应面模型可得出小黄

鱼热泵-热风联合干燥的最佳条件为: 热泵干燥温度  $A=50^{\circ}\text{C}$ 、转换点含水率  $B=32.62\%$ 和热风干燥温度  $C=44.01^{\circ}\text{C}$ , 预测响应面模型综合指标值为 0.5723, 考虑到实际生产, 作者确定最优的工艺参数为: 热泵干燥温度  $A=50^{\circ}\text{C}$ 、转换点含水率  $B=33\%$ 和热风干燥温度  $C=44^{\circ}\text{C}$ 。

为了验证最佳干燥条件, 在此条件下测得的联合干燥鲑鱼的 SMER 值为  $0.79\text{kg H}_2\text{O}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ , T-VBN 值为  $91.87\text{mg}/100\text{g}$ , 综合评定值为 0.5658 与理论预

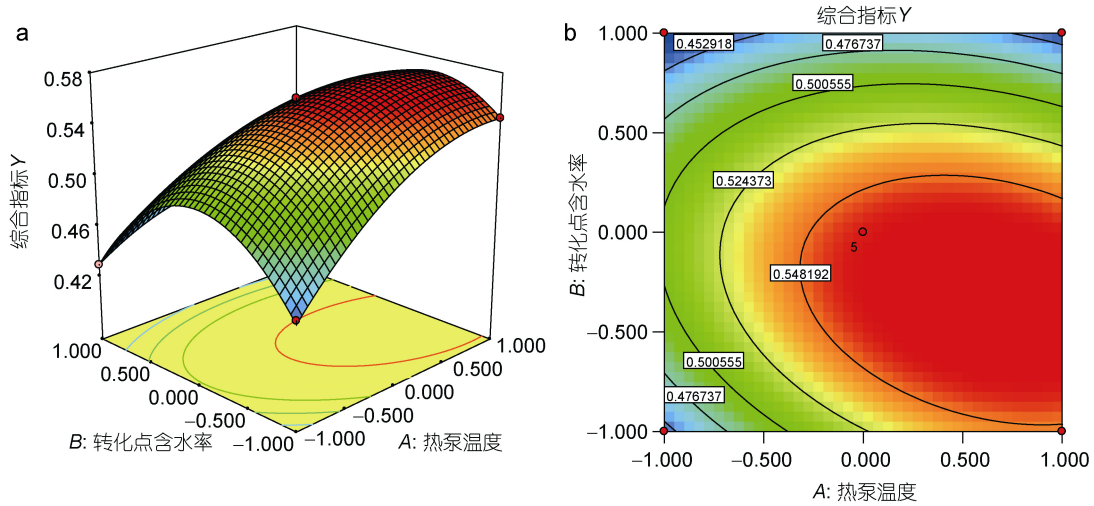


图 1 热泵温度与转化点含水率对综合指标影响的响应面图

Fig.1 The response surface diagram for the effects of heat pump drying temperature and moisture content conversion point on composite indicator

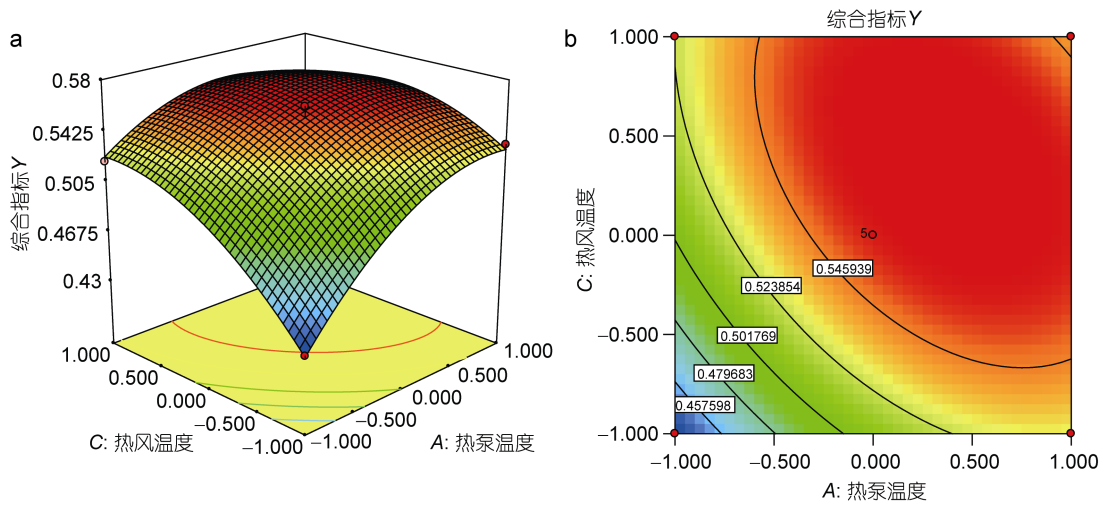


图 2 热风温度与热泵温度对综合指标影响的响应面图

Fig.2 The response surface diagram for the effects of hot air drying temperature and heat pump drying temperature on composite indicator

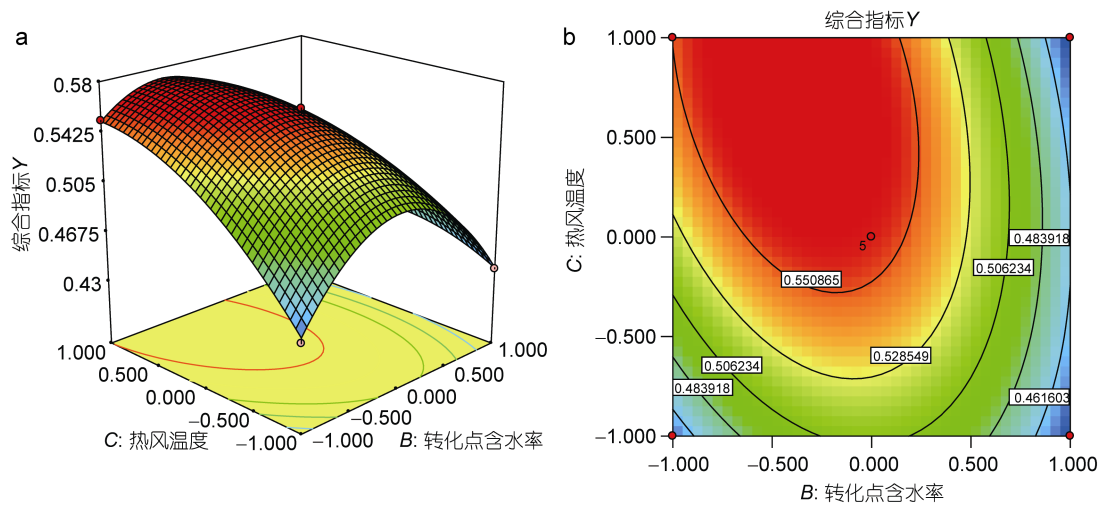


图 3 热风温度与热泵温度对综合指标影响的响应面图

Fig.3 The response surface diagram for the effects of hot air drying temperature and moisture content conversion point on composite indicator

测值的误差为 1.14%, 说明采用 RSM 法优化得到的鲑鱼联合干燥条件可靠。

### 2.3 联合干燥和单独干燥方式品质、能耗比较

**2.3.1 干制品的 T-VBN 值** 三种不同干燥方式下小黄鱼干制品挥发性盐基氮(T-VBN)含量情况如图 4 所示。从图 4 中可看出, 单一热泵干燥(HPD)产品和联合干燥产品的 T-VBN 值并没有明显差异。联合干燥(HPD+AD)产品的 T-VBN 值最低, 传统热风干燥(AD)效果最差, 且差异较显著。热泵技术之所以可以较好地保持小黄鱼干制品的品质, 是因为其干燥温度低的缘故。

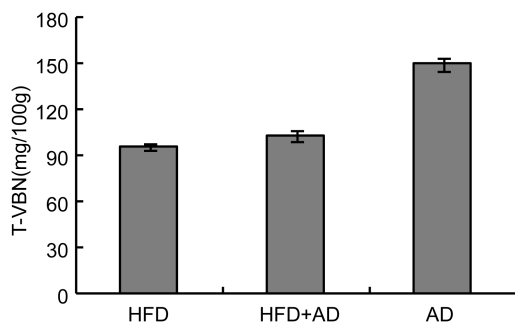


图 4 干燥方式对小黄鱼 T-VBN 值的影响

Fig.4 The T-VBN value of *P. polyactis* under different dry methods

**2.3.2 干制品的 SEMR 值** 据图 5 可以看出, 干燥方式对小黄鱼干的 SMER 值具有较大的影响, 其结论为: 联合干燥技术(HPD+AD)单位能耗除湿值高于单一热泵技术(HPD), 传统热风干燥(AD)单位能耗除湿值最低。热泵-热风联合干燥小黄鱼干的 SMER 值是传统热风处理样品的 153%, 是热泵干燥法干燥样品的 112%。因此可推出, 联合干燥可以比单纯热风干燥节能可达 34.6%。

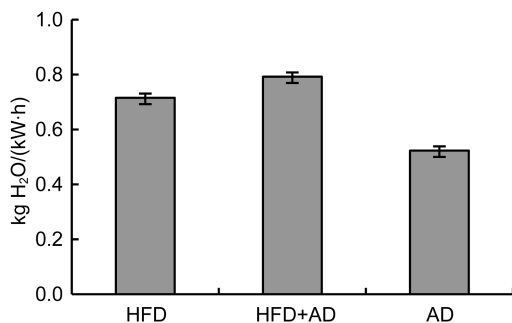


图 5 干燥方式对小黄鱼 SEMR 的影响

Fig.5 The SMER value of *P. polyactis* with different dry methods

## 3 结论

(1) 用响应面法对小黄鱼干燥工艺进行优化, 以热泵干燥温度、转换点含水率、热风干燥温度为影响因素, 以 SMER 和 T-VBN 值两者的综合指标  $Y$  为评价指标, 结果表明联合干燥最佳工艺条件为: 热泵干燥温度  $A=50^{\circ}\text{C}$ 、转换点含水率  $B=32.62\%$  和热风干燥温度  $C=44.01^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 根据实际操作条件, 调整最佳联合干燥工艺为: 热泵干燥温度  $A=50^{\circ}\text{C}$ 、转换点含水率  $B=33\%$  和热风干燥温度  $C=44^{\circ}\text{C}$ 。在经优化的条件下比较 HPD、HPD+AD、AD 三种干燥方式下的小黄鱼样品品质和能耗, 实验证明联合干燥工艺能较好地保持小黄鱼干的品质, 同时降低了干燥耗能 34.6%。

### 参 考 文 献

- 王钦德, 杨 坚, 2003. 食品试验设计与统计分析. 北京: 中国农业大学出版社, 10—16
- 叶盛英, 李远志, 罗树灿, 1999. 热泵除湿与热风联合干燥金针菇的研究. 华南农业大学学报, 20(3): 104—107
- 宁正祥, 1998. 食品成分分析手册. 北京: 中国轻工业出版社, 120—124
- 任爱清, 2009. 鲑鱼热泵-热风联合干燥节能研究. 干燥技术与设备, 7(4): 164—170
- 杜克镛, 蔡亚军, 杜知伟, 2005. 组合干燥系统在热敏性物料上的应用. 干燥技术与设备, 3(3): 135—137
- 李 蕾, 岳喜华, 于 欢等, 2009. 响应面法优化酸浆果多糖的提取工艺. 食品与生物技术学报, 28(1): 53—56
- 李志远, 张文明, 胡晓静等, 1999. 胡萝卜薄片热风与热泵结合干燥工艺及特性研究. 食品与发酵工业, 26(1): 3—6
- 张 懋, 张 鹏, 2006. 食品干燥新技术的研究进展. 食品与生物技术学报, 25(2): 117—119
- 张国琛, 毛志怀, 2004. 水产品干燥技术的研究进展. 农业工程学报, 20(4): 297—233
- 费荣昌, 2001. 试验设计与数据处理. 无锡: 江南大学出版社, 59—63
- 骆和东, 冷建荣, 王文伟, 2003. 自动凯氏定氮仪快速测定小黄鱼干的挥发性盐基氮实验研究. 海峡预防医学杂志, 9(3): 48—49
- 徐兆礼, 陈佳杰, 2009. 小黄鱼洄游路线分析. 中国水产科学, 16(6): 931—940
- 徐建国, 李华栋, 徐 刚等, 2008. 胡萝卜片热泵-热风联合干燥特征与模型化研究. 食品工业科技, 29(11): 145—148
- Carrington C G, Barneveld N J, Bannister P, 1996. Development of the ECNZ electric heat-pump dehumidifier drierilot plant. Institution of Professional Engineers, 2(1): 68—72
- Chou S K, Chua K J, 2001. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. Trends in Food Science & Tech-

- nology, 12: 359—369
- Eastone J E, 1957. The amino acid composition of fish collagen and gelatin. *Biochem J*, 65(2): 363—368
- Filiz I, Neslihan C, Zafer E, 2010. A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoli florets in three different drying systems. *Drying Technology*, 228(1/3): 193—204
- Hepbash A, Erbay Z, Golak N *et al*, 2010. An exergetic performance assessment of three different food driers. *Journal of Power and Energy*, 224(1): 1—12
- Watanabe T, 1982. Lipid nutrition in fish. *Comp Biochem Physiol*, 73: 3—15
- Zdzisaw E S, Ilona Kołodziejska, 1986. The composition and properties of squid meat. *Food Chemistry*, 20(3): 213—224

## OPTIMIZATION OF ENERGY-SAVING PARAMETERS ABOUT HEAT PUMP AND HOT AIR COMBINED DRYING OF *PSEUDOSCIAENA POLYACTIS* BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

SUN Ai, XIE Chao, HE Han-Lian

(School of Food Science and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316000)

**Abstract** Based on the preliminary experiments, heat pump drying (HPD) temperature, moisture conversion point, late hot air drying (AD) temperature were used as independent variables in this optimization study to reduce energy consumption in drying process of *Pseudosciaena polyactis*. A mathematical regression model for predicting composite indicator  $Y$  of SMER and T-VBN value was established by fitting Box-Behnken central composite design experimental results, the interactive effects of the independent variables on composite indicator  $Y$  of drying were investigated by response surface methodology. The optimal protocol for heat pump and hot air combined drying of *P. polyactis* was based on heat pump drying temperature ( $A=50^{\circ}\text{C}$ ), moisture changing point ( $B=32.62\%$ ) and hot air drying temperature ( $C=44.01^{\circ}\text{C}$ ). Under optimal conditions, comparison of sample quality and energy consumption was carried out between HPD, combined drying of heat pump and hot air drying (HPD+AD), AD. The quality of *P. polyactis* dried by HPD+AD was better than by hot air drying, and the optimum energy consumption reduced 34.8%.

**Key words** *Pseudosciaena polyactis*; combined drying; crafts optimization; response surface analysis