

# 鲍鱼热风干燥动力学及干燥过程数学模拟

贾敏,丛海花,薛长湖\*,薛勇,孙兆敏,李金章  
(中国海洋大学食品科学与工程学院,山东青岛 266003)

**摘要:**研究了鲍鱼在不同热风干燥温度下的干燥动力学特点,并构建了干燥过程的数学模型。热风干燥温度选取60、65、70、75、80℃;风速恒定为1m/s。干燥方法采取间歇干燥,分两个阶段进行。利用理论模型—扩散模型,和常见经验模型—Newton模型、Henderson and Pabis模型、Logarithmic模型、Two-terms模型、Page模型及Modified Page模型,对鲍鱼干燥过程的两个阶段分别进行描述。实验结果表明:鲍鱼热风干燥只经历降速阶段,水分扩散在鲍鱼干燥的过程中起主导作用。通过对实验数据进行统计分析,得到适合鲍鱼热风干燥的模型为Page模型(第一阶段干燥)和Two-terms模型(第二阶段干燥),模型的预测值与实际值比较吻合(Page模型 $r^2>0.999$ , $s<1\%$ ;Two-terms模型 $r^2>0.997$ , $s<2\%$ ),可以用来描述鲍鱼的热风干燥过程。

**关键词:**鲍鱼,热风干燥,动力学,数学模型

## Drying kinetics and mathematical modeling of abalone during the hot-air drying process

JIA Min, CONG Hai-hua, XUE Chang-hu\*, XUE Yong, SUN Zhao-min, LI Jin-zhang

(Department of Food Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** The drying dynamics characteristics and drying model of abalone were studied and constructed respectively, using a hot air dryer at five levels of drying air temperatures in the range of 60~80℃, and a fixed air flow velocity, 1m/s. The drying process was intermittent, divided into two stages, during which the drying behaviors of abalone were estimated respectively by mechanistic and empirical models: the diffusion model, Newton model, Henderson and Pabis model, Logarithmic model, Two-terms model, Page model, and Modified Page model. It could be seen that the drying process of abalone only contained deceleration stage and the removal of moisture from the material was governed by diffusion phenomenon. Among the models, the Page model and the Two-terms models were found to be the most suitable (Page model:  $r^2>0.999$ ,  $s<1\%$ ; Two-terms model:  $r^2>0.997$ ,  $s<2\%$ ) for predicting moisture ratio of the product in the first and second stage of the drying process.

**Key words:** abalone; hot-air drying; drying kinetics; mathematical modeling

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2012)01-0072-06

鲍鱼是一种名贵海产食品,其肉质柔嫩细滑,滋味浓郁鲜美,集珍、稀、贵、美于一体。由于鲍鱼的市场价值高且稳定,故有“软黄金”之美誉。目前,我国市场销售鲍鱼主要有鲜活、冷冻、罐头和干制品四种产品形式。干鲍是相当名贵的食品,干鲍发制后口感绵软滑嫩,风味别致。但目前鲍鱼干制却仍然以传统

的加工工艺为主,一般需要经过腌渍、水煮、晾晒等一系列复杂的程序,干燥过程不易控制,受天气影响较大,卫生条件差,无法实现大规模生产的要求<sup>[1]</sup>。热风干燥是现今应用最广泛的一种工业干燥方法,因其适应性强,操作、控制简单,卫生条件较好被广泛的应用于水产品干燥。目前关于鲍鱼热风干燥方面的研究较少,张亚琦等比较了鲍鱼热风、晾晒干燥,热风干燥时间约为晾晒干燥的50%,干燥效率大大提高<sup>[2]</sup>。但目前还没有关于鲍鱼热风干燥动力学及干燥过程数学模拟的相关研究,这方面的研究将对干鲍的工业化生产有一定的指导意义。干燥动力学研究主要是对物料干燥曲线的数学模拟,得到干燥方程,干燥过程的方程可以分为理论模型和经验模型。

收稿日期:2011-01-14 \* 通讯联系人

作者简介:贾敏(1988-),女,在读硕士研究生,研究方向:食品科学。

基金项目:海洋功能食品功效因子高效制备技术及产业化示范(201105029);海洋公益性行业科研专项;水环境污染、水产食品安全及废弃物综合利用技术研究(2010DFA31330)国际科技合作项目。

理论模型最常用的是扩散模型,源自于菲克第二定律。当热风干燥鲍鱼的过程被内部水分的迁移所控制,即干燥过程主要存在于降速阶段时,干燥过程可以采用扩散模型来描述。除了理论模型外,常用的数学模型还有Henderson and Pabis模型、Newton模型、Logaritmic模型、Two-terms模型、Page模型及Modified Page模型等多种模型,本文中统一称作经验模型。理论模型的形式复杂,应用不方便,推导过程只考虑了湿物料的内扩散阻力,误差较大。Henderson and Pabis模型是理论模型的简化式,形式较为简单,并能满足工程的精度要求;Newton模型、Logaritmic模型、Two-terms模型、Page模型及Modified Page模型是在Newton模型的基础上,结合干燥动力学实验建立起来的,精度较高,得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。但这些经验模型均含有待定经验常数,不仅这些常数的物理意义不够明确,而且不同研究者之间得到的这些常数也有差异。孙妍研究了淡干海参和盐渍海参的热风干燥动力学特点,并建立了干燥过程的数学模型,海参的干燥行为最适合用Two-terms模型描述<sup>[4]</sup>。石启龙发现适合竹荚鱼热泵干燥的数学模型为Page模型<sup>[5]</sup>。在一些农产品干燥中Page模型表现了较好的拟合度<sup>[6-8]</sup>。本文通过研究不同温度下鲍鱼热风干燥的动力学特点并建立用于描述干燥过程的数学模型,对于预测和控制鲍鱼干燥过程中的水分变化有一定意义,可以优化干燥过程,保证产品品质,有效防止干燥过程中过度干燥导致品质劣化及能源的过度消耗。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验仪器

BP121S赛多利斯分析天平 上海精密实验设备有限公司,称量范围:0~120g,精度:0.1mg;1HP-II热风干燥实验机 青岛欧美亚科技有限公司,温度范围30~300℃,工作室尺寸40cm×40cm×50cm;游标卡尺 江西工具厂,量程:0~200mm,精度0.02mm。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 实验采用样品为皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai Ino*),带壳重(59.1±3.8)g,壳长(7.2±0.4)cm,购于青岛水产品批发市场。鲜活鲍鱼使用如下方法处理:将圆形刀刀贴在鲍鱼的内壳,轻轻地来回划动,使其壳肉分离,取出鲍鱼肉,摘除内脏团、生殖腺。加盐使用软毛刷洗净鲍鱼肉表面的黑膜。将鲍鱼肉在3.5%的氯化钠溶液煮沸10min,随后用滤纸吸干表面的水分作为样品备用。样品的平均干基含水率为233%±2.8%。

#### 1.2.2 干燥曲线的测定

1.2.2.1 干燥条件的确定 本实验除温度外,其他操作条件恒定:干燥时空气的相对湿度为30%~34%,风速1m/s,干燥温度分别设定60、65、70、75、80℃。水产品干燥中常加入罨蒸工序<sup>[2,9]</sup>。由于鲍鱼的肌肉组织较为致密,属于较难干燥的类型,且干燥过程中易出现表面硬化现象,因此采用间歇干燥。干燥分两个阶段,每个阶段干燥时间为13h,第一阶段结束后将样品置于封口袋中过夜,使鲍鱼内外水分在这个封闭环境中得以重新均匀分布,再进行第二阶段的干燥,

这样可以节省第二阶段的干燥时间,更快的达到干燥终点。罨蒸的工序不计入干燥时间内。

#### 1.2.2.2 测定指标及方法

a.干基含水率 进行干燥实验时,样品平铺、均匀放置,每隔1h称重,并计算干基含水率。

鲍鱼的干基含水率计算公式为:

$$M_t(\%) = \frac{(G_t - G_0)X}{G_0X} \times 100\% \quad \text{式(1)}$$

式中, $M_t$ 为t时刻的干基含水率, $G_0$ 、 $G_t$ 分别为开始干燥和干燥至t时刻鲍鱼质量,g; $X$ 为鲍鱼干基率,%(g干物质/g鲍鱼)。实验结果为三次平行测定的平均值。

b.水分比MR MR用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被干燥除去,可以用来反应物料干燥速率的快慢。计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$MR = \frac{G_t - G_0X}{G_0 - G_0X} \quad \text{式(2)}$$

分别计算干燥过程中两个干燥阶段MR随时间的变化,作为模型拟合的原始数据。

### 1.2.3 鲍鱼干燥过程的模拟

#### 1.2.3.1 理论模型—扩散模型

a.鲍鱼体内水分有效扩散系数和活化能的研究。鲍鱼预煮后,形状较平整,可以看作平板状物料,平板物料的非克第二定律的化简式为<sup>[1]</sup>:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad \text{式(3)}$$

式中, $D_{eff}$ 为有效水分扩散系数, $m^2/s$ ;L为平板厚度,m; $t$ 为干燥时间,s。

此方程中有效扩散系数 $D_{eff}$ 通常由实验所得干燥曲线决定。有效扩散系数与温度的相关性遵循Arrhenius关系,即:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T}\right) \quad \text{式(4)}$$

式中, $E_a$ 为扩散活化能,kJ/mol; $D_0$ 为扩散常数, $m^2/s$ ;T为干燥温度,K; $R_g$ 为理想气体常数, $8.314 \times 10^{-3} kJ/mol \cdot K$ 。

式(3)两端取对数,利用MR的对数值对干燥时间 $t$ 作图,求曲线斜率。利用线性回归求得不同干燥条件下的扩散系数。

式(4)两端取对数, $\ln(D_{eff})$ 对 $1/T$ 作图求得扩散活化能。

b.扩散模型对于鲍鱼干燥过程的模拟。使用扩散模型模拟干燥过程,得到MR预测值。利用决定系数 $r^2$ 和模型标准误差s来衡量扩散模型中预测值与实验数据之间的拟合程度,计算方法见1.2.3.3数据分析。

#### 1.2.3.2 经验模型 选取以下常见的模型用于鲍鱼干燥曲线的拟合。

对实验所得干燥曲线进行6种不同数学模型的回归,并使用决定系数 $r^2$ 和模型的标准误差s来评价数学模型的计算值与实际测定值的拟合程度。

#### 1.2.3.3 数据分析 利用下面的指标来衡量扩散模型中预测值与实验数据之间的拟合程度。

$$\text{决定系数: } r^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (z_j - o_j)^2}{\sum_{j=1}^N (o_j - o_m)^2} \quad \text{式(5)}$$

表1 用于鲍鱼干燥过程拟合的经验模型

Table 1 Empirical models for fitting the drying of abalone

模型名称	表达式
Newton模型	$MR = \exp(-kt)$
单项扩散模型(Henderson and Pabis)	$MR = a \exp(-kt)$
Logaritmnic模型	$MR = a \exp(-kt) + c$
两项扩散模型(Two-terms)	$MR = a_1 \exp(-k_1 t) + a_2 \exp(-k_2 t)$
Page模型	$MR = \exp(-kt^n)$
修正Page模型	$MR = \exp[-(kt)^n]$

注:其中k、k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>、n、a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub>均为待定系数。

$$\text{模型的标准误差: } s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (z_j - o_j)^2}{N - P}} \quad \text{式(6)}$$

其中, z<sub>j</sub>为预测值, o<sub>j</sub>为实际测定值, o<sub>m</sub>为实际测定值的平均值, N为数据数目, P为参数个数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 鲍鱼不同温度下干燥曲线

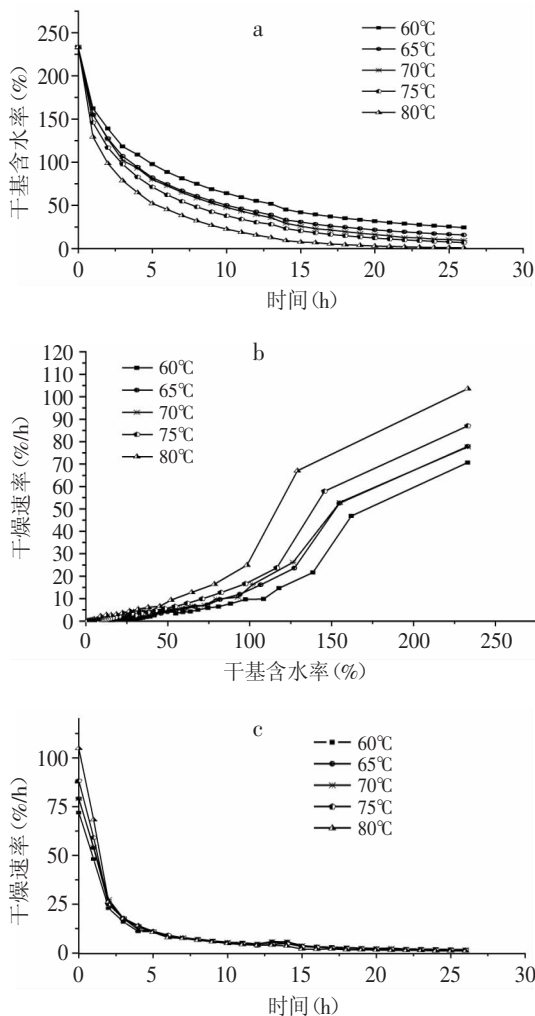


图1 鲍鱼热风干燥曲线

Fig.1 Hot air drying curves of abalone

注:a.鲍鱼含水率与干燥时间曲线;b.干燥速率随鲍鱼含水率变化曲线;c.干燥速率随干燥时间的变化曲线。

图1显示出不同热风温度条件下,鲍鱼干基含水率随干燥时间的变化曲线。图1-a鲍鱼含水率与干燥

时间曲线的关系,从图中可以看出,热风温度越高,失水速率就越快,干燥所需时间就越短。经过26h的干燥,60、65、70、75、80℃温度下样品的最终干基含水率分别为:24.4%、15.7%、9.5%、6.9%、1%。根据干贝行标,干燥需进行至安全含水率(16%±1%)以下<sup>[1]</sup>。当含水率从233%降至16%时,80℃干燥所需时间为12h,75℃为18h,70℃为22h,65℃为26h,60℃为68h(图中未列出)。图1-b、1-c分别为不同热风温度条件下,干燥速率对于干基含水率和干燥时间的变化曲线。图1-c中5条曲线总体呈现下降趋势,1-c图中13~14h存在的一处波动是由于干燥过程中加入了罨蒸工艺,在经历了13h的第一干燥阶段后将鲍鱼放入封口袋中过夜,使得鲍鱼内部水分向外扩散,所以在第二阶段干燥开始时出现了短时的干燥速率升高现象。这与相关文献的结论一致<sup>[2]</sup>。不考虑罨蒸对干燥速率产生的影响,鲍鱼的两个干燥阶段均没有经历升速、恒速干燥阶段,而是直接进入降速干燥阶段。完全的降速阶段说明,鲍鱼在干燥过程中,内部水分的扩散是主导因素,直接决定了鲍鱼的干燥特性。

### 2.2 鲍鱼干燥过程的模拟

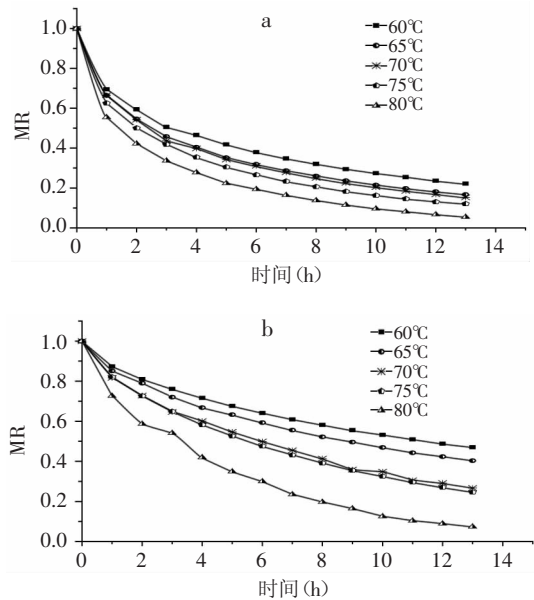


图2 水分比干燥时间的变化曲线

Fig.2 Curves of moisture ratio vs. drying time

注:a.干燥第一阶段;b.干燥第二阶段(干燥第二阶段MR初始值仍从1开始计)。

图2为干燥第一和第二阶段的水分比随时间的变化情况。根据两个阶段的MR数据进行扩散模型和经验模型的数学模拟。

#### 2.2.1 扩散模型对鲍鱼干燥过程的模拟

2.2.1.1 有效扩散系数的计算 将式(3)两端取对数得式(7),可看做MR和干燥时间t<sub>d</sub>的线性方程。

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t_d}{L^2} \quad \text{式(7)}$$

分别对图2中两个干燥阶段的实验数据按照上式绘出相应的点。进行线性拟合后,根据方程斜率、截距及鲍鱼厚度L(取实验测得的平均值,1.32×10<sup>-2</sup>m),



可以求出鲍鱼两个干燥阶段的有效扩散系数。

不同温度下鲍鱼体内水分的有效扩散系数 $D_{eff}$ 及线性回归的决定系数 $r^2$ 见表2。在实验温度范围内,鲍鱼第一阶段干燥的有效扩散系数分布在 $5.0154 \times 10^{-10} \sim 9.7695 \times 10^{-10} m^2/s$ 的范围内;第二阶段干燥的有效扩散系数分布在 $2.6570 \times 10^{-10} \sim 9.6266 \times 10^{-10} m^2/s$ 范围内,这个结果与Panagiotou等人报道的食品物料干燥过程中测得的有效扩散系数在 $10^{-9} \sim 10^{-11} m^2/s$ 范围内吻合<sup>[12]</sup>。

表2 不同温度下鲍鱼体内水分的有效扩散系数

Table 2 The effective diffusivity ( $D_{eff}$ ) and  $r^2$  for the drying abalone at different temperatures

温度(°C)	干燥第一阶段		干燥第二阶段	
	$D_{eff}(\times 10^{-10})$	$r^2$	$D_{eff}(\times 10^{-10})$	$r^2$
60	5.0154	0.9489	2.6570	0.9786
65	5.9979	0.9509	3.2150	0.9812
70	6.2964	0.9565	4.7524	0.9909
75	7.2257	0.9616	5.0366	0.9934
80	9.7695	0.9775	9.6266	0.9975

在实验范围内,两个干燥阶段的有效传递系数均随温度的升高而增大,且在干燥温度由75°C升高至80°C时增幅较大。根据式(4)有效扩散系数与温度间存在指数型的正相关关系,因此会出现高温时随温度升高,有效扩散系数的增幅比低温时随温度升高的增幅大。有效传递系数的大小决定了降速干燥阶段水分内部传递的速度,表2也揭示出在降速干燥阶段,鲍鱼水分的传递速度随温度升高而增大。通过两个干燥阶段的对比看出,不同温度下,干燥第二阶段的扩散系数均小于第一阶段,分析原因可能是鲍鱼组织致密,随干燥的进行,组织的空隙减小,导致第二阶段扩散阻力增大,内部水分扩散速度减小。

2.2.1.2 扩散活化能的计算 进一步求扩散常数 $D_0$ 和扩散活化能 $E_a$ ,将式(4)两边取对数得:

$$\ln(D_{eff}) = \ln D_0 - \frac{E_a}{R_g T} \quad \text{式(8)}$$

将相应的数值带入式,可得到干燥第一阶段和第二阶段扩散系数和温度间的关系。

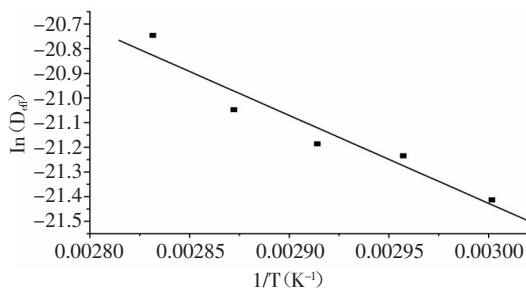


图3 有效扩散系数和温度间的关系(干燥第一阶段)

Fig.3 Relationship between effective moisture diffusivity and temperature (first stage of drying)

图3、图4分别为干燥两个阶段有效扩散系数与温度的关系,所得直线中的五个点均呈现出了较好的线性关系,其决定系数 $r^2$ 均为0.925。根据直线的斜率和截距可以求出鲍鱼第一阶段干燥的扩散活化能 $E_a$ 为29.6240kJ/mol;第二阶段干燥的扩散活化能 $E_a$ 为

58.2845kJ/mol。这两个值与Chirife, J.报道的第一减速阶段的活化能在14.2~39.8kJ/mol之间,第二减速阶段的活化能在33.5~58.6kJ/mol之间的结论相符<sup>[13]</sup>。

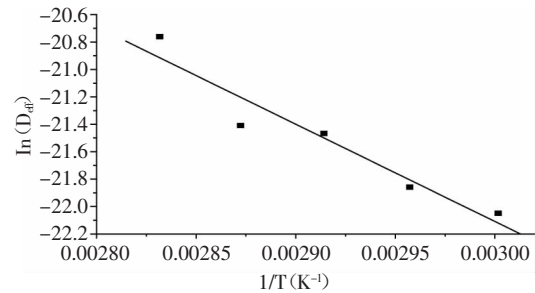


图4 有效扩散系数和温度间的关系(干燥第二阶段)

Fig.4 Relationship between effective moisture diffusivity and temperature (second stage of drying)

2.2.1.3 扩散模型对鲍鱼干燥过程的模拟 使用活化能预测MR值,计算MR预测值与实验测定值之间的相关系数的平方 $r^2$ 和标准差 $s$ ,结果如表3所示。

表3 不同温度下鲍鱼干燥扩散模型的拟合度分析

Table 3 Statistical analysis of the diffusion model fitted to the drying data of abalone

温度(°C)	干燥第一阶段		干燥第二阶段	
	$r^2$	$s(\times 10^{-2})$	$r^2$	$s(\times 10^{-2})$
60	0.8801	7.1973	0.7617	7.3985
65	0.8562	8.4362	0.7713	8.1630
70	0.9075	6.8799	0.9084	6.3575
75	0.9106	7.0090	0.7652	10.5145
80	0.8545	9.4288	0.9568	5.5278

从表3看出,扩散模型对于鲍鱼干燥过程模拟的拟合度不高,决定系数较小,标准差较高。原因是理论方程的推导过程只考虑了湿物料的内扩散阻力,误差较大,而实际的干燥过程是受多种因素影响的复杂过程。

2.2.2 经验模型对鲍鱼干燥过程的模拟 实验中使用Newton等六种模型对鲍鱼干燥模型的特点进行描述。决定系数( $r^2$ )、标准差( $s$ )用来作为模型拟合程度的判断标准。表4为拟合情况。

在实验温度范围内,干燥第一阶段,Page模型有很高的 $r^2$ ( $r^2 > 0.999$ ),很小的标准差( $s < 1\%$ );干燥第二阶段,Two-terms模型具有很高的 $r^2$ ( $r^2 > 0.997$ ),很小的标准差( $s < 2\%$ ),因此选择Page模型和Two-terms模型来预测和研究鲍鱼第一阶段和第二阶段干燥的特点。

表5为干燥第一阶段的Page模型和干燥第二阶段的Two-terms模型。

图5、图6为模型预测值与实际值的比较,可以看出模型对干燥过程的预测效果较为理想。

### 3 结论

本实验研究了鲍鱼干燥的干燥动力学特点,并构建了干燥过程中两个干燥阶段的数学模型。得出结论如下:

3.1 不同温度下,鲍鱼的热风干燥过程均只经历降速阶段,水分扩散在鲍鱼的干燥过程中起主导作用;

表4 鲍鱼干燥经验模型的拟合度分析

Table 4 Statistical analysis of the empirical models fitted to the drying data of abalone

模型名称及表达式	温度(°C)	干燥第一阶段		干燥第二阶段	
		r <sup>2</sup>	s(×10 <sup>-2</sup> )	r <sup>2</sup>	s(×10 <sup>-2</sup> )
Newton模型 MR=exp(-kt)	60	0.84489	8.4971	0.93192	4.0988
	65	0.87027	8.3126	0.93989	4.3474
	70	0.88113	8.0932	0.96715	3.9497
	75	0.89762	7.7846	0.97479	3.5777
	80	0.92511	7.0356	0.98701	3.1449
Henderson and Pabis模型 MR=aexp(-kt)	60	0.92005	6.3482	0.97251	2.7144
	65	0.92519	6.5727	0.97454	2.9415
	70	0.92965	6.4807	0.98493	2.7855
	75	0.93582	6.4187	0.98823	2.5433
	80	0.94378	6.3482	0.99154	2.6415
Logaritmnic模型 MR=aexp(-kt)+c	60	0.97936	3.3615	0.99433	1.2876
	65	0.98224	3.3466	0.9939	1.5037
	70	0.98209	3.4205	0.99246	2.0583
	75	0.98048	3.7014	0.99581	1.5838
	80	0.9754	4.3818	0.99213	2.6619
Two-terms模型 MR=a <sub>1</sub> exp(-k <sub>1</sub> t)+a <sub>2</sub> exp(-k <sub>2</sub> t)	60	0.99897	0.7883	0.99926	0.4945
	65	0.99915	0.7659	0.99898	0.6450
	70	0.99927	0.7218	0.99900	0.7863
	75	0.99931	0.7267	0.99983	0.3325
	80	0.99989	0.3017	0.99771	1.5056
Page模型 MR=exp(-kt <sup>n</sup> )	60	0.99967	0.4101	0.99988	0.1802
	65	0.99992	0.2153	0.99951	0.4087
	70	0.99935	0.6225	0.99776	1.0739
	75	0.99985	0.3053	0.99962	0.4542
	80	0.9991	0.8028	0.99490	2.0512
修正Page模型 MR=exp[-(kt) <sup>n</sup> ]	60	0.99921	0.4283	0.9998	0.1882
	65	0.9998	0.2249	0.99918	0.4268
	70	0.99838	0.6502	0.99626	0.6502
	75	0.99961	0.3188	0.99938	1.1217
	80	0.9976	0.7590	0.99058	2.1425

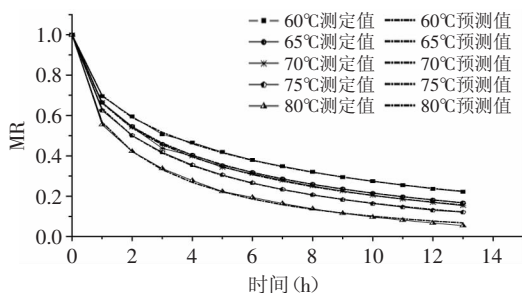


图5 干燥第一阶段MR测定值与Page模型预测值的比较

Fig.5 Comparison of actual and predicted value by Page model in the first stage of drying

表5 不同温度下鲍鱼干燥的模型

Table 5 Empirical model for drying abalone at different temperatures

温度(°C)	表达式	
	干燥第一阶段(Page模型)	干燥第二阶段(Two-term模型)
60	MR=exp(-0.3583t <sup>0.55726</sup> )	MR=0.15063exp(-0.72463t)+0.846585exp(-0.0462t)
65	MR=exp(-0.41017t <sup>0.57362</sup> )	MR=0.16485exp(-0.77105t)+0.8324exp(-0.057t)
70	MR=exp(-0.41343t <sup>0.58545</sup> )	MR=0.86102exp(-0.09183t)+0.13892exp(-1.46908t)
75	MR=exp(-0.45892t <sup>0.59405</sup> )	MR=0.14444exp(-1.0775t)+0.85476exp(-0.09665t)
80	MR=exp(-0.56698t <sup>0.60687</sup> )	MR=0.11739exp(-50.6329t)+0.88257exp(-0.18629t)

(下转第80页)

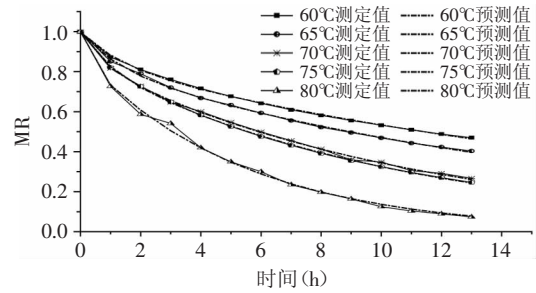


图6 干燥第二阶段MR测定值与Two-terms模型预测值的比较

Fig.6 Comparison of actual and predicted value by Two-terms model in the second stage of drying

由于鲍鱼肌肉组织较为致密,干燥过程易出现表面硬化现象,在干燥过程中加入罨蒸工艺,能使鲍鱼的内外水分分布均匀,对提高干燥速率有一定的作用。

3.2 在实验温度范围内,鲍鱼干燥第一阶段的有效扩散系数分布在 $5.0154 \times 10^{-10} \sim 9.7695 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ,扩散活化能为 $29.6240 \text{kJ/mol}$ ;干燥第二阶段的有效扩散系数分布在 $2.6570 \times 10^{-10} \sim 9.6266 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ ,扩散活化能为 $58.2845 \text{kJ/mol}$ 。从干燥特性参数可以看出,随着干燥的进行,水分扩散阻力增大,干燥更加困难。

3.3 对鲍鱼干燥过程进行模拟,理论模型(扩散模型)误差较大,而经验模型有较高的准确度。鲍鱼干燥第一阶段的干燥行为最适合用Page模型进行描述( $r^2 > 0.999$ );第二阶段的干燥行为最适合用Two-terms模型描述( $r^2 > 0.997$ )。

参考文献

[1] 张国琛,毛志怀.水产品干燥技术的研究进展[J].农业工程学报,2004,20(4):297-299.  
 [2] 张亚琦,高昕,许加超,等.鲍鱼热风、晾晒干燥的比较实验[J].农业工程学报,2008(1):296-299.  
 [3] 王宝和.干燥动力学研究综述[J].干燥技术与设备,2009(2):51-56.  
 [4] 孙妍.海参干燥动力学的研究[D].青岛:中国海洋大学,2007.  
 [5] 石启龙,赵亚,李兆杰,等.竹荚鱼热泵干燥数学模型研究[J].农业机械学报,2009(5):110-114.  
 [6] 诸爱士,成忠.西芹热风干燥动力学研究[J].农机化研究,2007(3):139-142.  
 [7] 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(4):362-367.  
 [8] 黄姬俊,郑宝东.香菇微波真空干燥特性及其动力学[J].福建农林大学学报:自然科学版,2010(3):319-324.  
 [9] 丛海花,薛长湖,孙妍,等.热泵-热风组合干燥方式对干制

质,并且能起到增加冻藏品脆度的作用。

### 3 结论与讨论

研究表明,L-半胱氨酸对冻藏香蕉片具有很好的抑制效果,这可能是因为L-半胱氨酸是一种具有生理功能的含硫氨基酸,其侧链上含有一个巯基(-SH)的缘故<sup>[8]</sup>,而且L-半胱氨酸是组成蛋白质的20种氨基酸之一,是一种高效安全的PPO抑制剂,其在食品保鲜中的应用已有一些研究<sup>[9-11]</sup>。L-半胱氨酸对PPO活性的抑制作用表现为与酶促褐变反应的中间产物醌生成稳定的无色物质,抑制了次级氧化和聚合反应,阻止了黑色素的生成<sup>[12]</sup>。有关半胱氨酸对PPO的抑制作用机理的研究仍存在争论,目前有以下两种解释:第一种是硫醇类化合物可以结合酶活性中心的铜离子从而抑制酶的活力;第二种是硫醇类化合物可以在酶促反应过程中与生成的产物醌发生快速的非酶催化反应而结合形成一种稳定的无色化合物。通常认为起主要作用的是第二种可能<sup>[13]</sup>。Richard等<sup>[14]</sup>认为,L-半胱氨酸与酶促反应生成的产物结合生成的无色物质是PPO的竞争性抑制剂;Christine等<sup>[15]</sup>的研究也肯定了L-Cys与酶蛋白发生结合的可能。

实验表明,热处理能够降低酶活性,处理时间越长,PPO失活越明显。陈乃富<sup>[15]</sup>、田金辉<sup>[16]</sup>研究也得到了相同结果。前人研究表明,PPO属非耐热酶,通常在60~70℃下很短时间内就会发生不可逆失活<sup>[16]</sup>。李胜等<sup>[17]</sup>研究表明,香蕉酱在80℃加热10s后,PPO活性损失50%,在90℃下加热10s后,PPO所剩活性不到1%,张勇等<sup>[12]</sup>采用了沸水浴钝化处理对香蕉PPO褐变性质进行研究,发现热处理前5s及10~15s酶钝化较缓,5~10s较快,15~20s又减缓,过了20s基本没有PPO。由此可见,不同的热处理温度钝化PPO活性的所需的时间不同,即使是在100℃下也需要一段时间才能将PPO活性完全钝化。热处理温度和热处理时间的选择对钝化PPO活性起着至关重要的作用,本实验设置85℃热烫,发现热处理时间越长,冻藏香蕉片的品质越差。因此,在运用热处理方法钝化PPO活性时应根据保持果品原有风味和品质的要求对热处理温度和时间进行筛选,使热处理后的冻藏香蕉片在加工、冻藏及解冻过程的较长一段时间内不褐变,并保持理想的产品色泽、外观和口味。

正交实验结果表明,半胱氨酸对PPO活性的抑制效果具有极显著影响,其次是氯化钙。有研究表明,果实组织中维持较高的钙水平可以更长保持果实硬度,降低呼吸速率,抑制乙烯产生,促进蛋白质合成,减少冷害发生,从而延长果实贮藏寿命,提高果实商品价值。钙也影响果实的其他性质,如V<sub>C</sub>含量、香味物质的产生等<sup>[18]</sup>。通过正交实验最终选取能

够控制冻藏香蕉片褐变,并且能够保质增脆的最优化组合为:0.1% L-半胱氨酸,0.05%异抗坏血酸,0.1%蔗糖和0.1%氯化钙。

### 参考文献

- [1] Mowlah G, Takono K, Kamoi I. Browning phenomenon by banana polyphenoloxidases[J]. Journal of Japanese Society of Food Science and Technology, 1983, 30(4): 245-251.
- [2] Montgomery M, W Sgarbieri V C. Isoenzymes of banana polyphenoloxidase[J]. Phytochemistry, 1975, 14(4): 1245-1249.
- [3] 包海蓉, 王华博. 草莓冻藏过程中多酚氧化酶、过氧化物酶及维生素C的变化研究[J]. 食品科学, 2005, 26(8): 434-436.
- [4] 张水华. 食品分析实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [6] 宁正祥, 赵谋明. 食品生物化学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1995.
- [7] 匡银近. 氯化钙浸果对草莓保鲜的生理效应[J]. 江西园艺, 2001(1): 17-18.
- [8] 陈敏元. L-半胱氨酸市场浅析[J]. 现代化工, 1994(11): 40-41.
- [9] Iyidogan N F, Bayindirh A. Effect of L-cysteine, kojic acid and 4-hexylresorcinol combination on inhibition of enzymatic browning in Amasya apple juice[J]. J Food Engineering, 2004, 62: 299-304.
- [10] 石小琼, 邓金星, 钟清泉, 等. L-半胱氨酸和琥珀酸2,2-二甲基酰肼在蘑菇保鲜上的应用[J]. 食用菌学报, 2001, 8(2): 29-33.
- [11] 邱龙新, 黄浩, 陈清西. 半胱氨酸对马铃薯多酚氧化酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2006, 27(4): 37-40.
- [12] 张勇, 池建伟, 温其标, 等. 香蕉多酚氧化酶褐变性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(5): 53-57.
- [13] Christine R, Florence R, Claude R, et al. A kinetic study of the inhibition of palmito polyphenol oxidase by L-Cysteine[J]. Int J Biochem Cell Biol, 1996, 28(4): 457-463.
- [14] Richard-Forget F C, Goupy G M, Nicolas J J. Cysteine as an inhibitor of enzymatic browning Kinetic studies[J]. J Agric Food Chem, 1992, 40: 2108-2113.
- [15] 陈乃富. 热处理法钝化菠菜多酚氧化酶活性的工艺条件研究[J]. 食品工业科技, 2005, 26(10): 49-54.
- [16] 田金辉, 许时婴, 王璋. 热烫处理对黑莓果汁营养成分和多酚氧化酶活力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(4): 133-137.
- [17] 李胜, 李枚秋. 香蕉酱抗褐变的工艺研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(2): 14-17.
- [18] 张承林. 果实品质与钙素营养[J]. 果树科学, 1996, 13(2): 119-123.
- [12] 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.
- [13] Chirife J. Fundamentals of the drying mechanism during the air dehydration of foods[J]. Hemisphere Publishing Corp, 1983(2).

(上接第76页)

海参品质的改善[J]. 农业工程学报, 2010(5): 342-346.

[10] Babalis S J, Papanicolaou E, Kyriakis N, et al. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*)[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75: 205-214.

[11] SC/3207-2000, 中华人民共和国水产行业标准—干贝[S].