

金银花真空远红外辐射干燥动力学模型*

刘云宏^{1,2} 朱文学² 马海乐¹

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013; 2. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471003)

【摘要】 利用改装的干燥设备,考察了辐射板温度、干燥室压力和物料量对金银花真空远红外辐射干燥的影响。通过水分比曲线的线性化,确定了动力学模型方程为 $M_R = \exp(-Kt^n)$ 。采用二次回归正交试验设计,拟合了模型参数 n 、 K 与各干燥参数的关系式。结果表明,该模型的理论值和实测值吻合良好,能够很好地表达和预测金银花真空远红外辐射干燥的水分比变化规律。

关键词: 金银花 真空干燥 远红外辐射 数学模型

中图分类号: TQ028.6⁺76; S567.7⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0105-05

Kinetics Modeling of Vacuum Far-infrared Radiation Drying on Honeysuckle

Liu Yunhong^{1,2} Zhu Wenxue² Ma Haile¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract

The influence of the temperature of the radiation heater, pressure in the chamber and sample mass on the drying characteristics of vacuum far-infrared radiation drying on honeysuckle was studied by using a self-transformed dryer. By means of linearization of moisture ratio curves, the kinetics model equation was determined as $M_R = \exp(-Kt^n)$. Quadratic orthogonal regression was employed to fit the relationship between modeling coefficients (n and K) and drying parameters. The results showed that the calculated values of mathematical model were quite suitable for the experimental data, and the model could illustrate moisture ratio changing regulation of vacuum far-infrared radiation drying on honeysuckle very well.

Key words Honeysuckle, Vacuum drying, Far-infrared radiation, Mathematical model

引言

金银花为忍冬科(Caprfoiaceae)植物忍冬(Lonicera Japonica Thunb.)的花蕾,是我国重要的中药材^[1]。金银花采摘后应立即干燥,否则会发生褐变,有效成分也会减少。传统的干燥方法不但干燥时间长,而且干燥参数难以控制,干燥效果也不好^[2],因此,当前的研究趋势是利用现代干燥手段进行金银花的加工,目前已有金银花微波干燥、冷冻干燥、强制通风干燥^[2-4]等报道。红外加热技术在农业中的应用越来越广泛^[5],而真空远红外辐射干

燥由于是在低压及无氧的情况下进行非接触低温加热,能够缩短干燥时间,较好地保持物料的性状和减少物料中热敏和易氧化成分的变性^[6],越来越受到关注。目前已有洋葱、香蕉和荔枝等的真空远红外辐射干燥研究报道^[7-9],但尚无金银花真空远红外辐射干燥的研究。

本文以金银花为原料,利用真空远红外辐射干燥技术,研究辐射板温度、干燥室压力和物料量对干燥过程的影响,并通过二次回归通用旋转正交组合设计及试验验证,来建立具有良好拟合性和预测性的金银花真空远红外辐射干燥动力学模型。

收稿日期: 2009-10-09 修回日期: 2009-12-06

* 河南省杰出青年基金资助项目(084100510005)

作者简介: 刘云宏,博士生,河南科技大学讲师,主要从事农产品加工与贮藏工程研究, E-mail: beckybin@mail.haust.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

金银花:购于河南省洛阳市新安县金银花种植基地,要求新鲜饱满、颜色青绿、色泽鲜亮。

1.2 试验设备与仪器

真空远红外辐射干燥装置的结构如图 1 所示,结构说明参照文献[10]。

1.3 试验方法

按试验要求设定真空干燥机的辐射板温度和压力值,每次试验前设备均预热 30 min。去除颜色、质地较差的金银花后,称取符合试验要求的金银花,铺放到物料盘上。将物料盘放入干燥机,本试验中物料盘距辐射板 10 cm。开启设备,并定期记录数据,直到质量读数不再发生变化时停止干燥。

单因素试验时,固定干燥室压力 3 000 Pa、物料量 40 g,改变辐射板温度为 70、80、90、100 和 110℃,考察板温对干燥特性的影响;固定辐射板温度 100℃、物料量 40 g,改变干燥室压力为 800、3 000、12 000 和 40 000 Pa,观察压力对干燥过程的影响;在辐射板温度 90℃、干燥室压力 5 500 Pa 的条件下,改变物料量为 40 g(1 层物料)、80 g(2 层)和 120 g(3 层),研究物料量对干燥过程的影响情况。

选取辐射板温度、干燥室压力和物料量为试验因素,采用三元二次通用旋转回归组合设计,进行金银花真空远红外辐射干燥的多因素试验。因素水平编码表如表 1 所示。

表 1 因素水平编码表
Tab.1 Coding of factors and levels

编码	因素		
	辐射板温度 $x_1/℃$	干燥室压力 x_2/Pa	物料量 x_3/g
1. 682	106. 8	10 200	120. 0
1	100. 0	8 300	103. 8
0	90. 0	5 500	80. 0
-1	80. 0	2 700	56. 2
-1. 682	73. 2	800	40. 0
Δ_j	10	2 800	23. 8

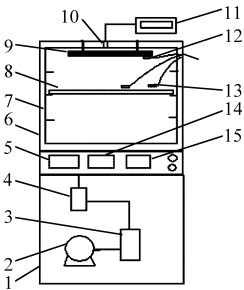


图 1 真空远红外辐射干燥试验装置示意图

Fig.1 Scheme of vacuum far-infrared radiation drying equipment

1. 下箱体 2. 真空泵 3. 干燥罐 4. 电磁阀 5. 温度显示器 6. 上箱体 7. 料架 8. 料盘 9. 远红外加热板 10. 质量传感器 11. 质量显示器 12. 板面温度传感器 13. 物料温度传感器 14. 压力控制器 15. 温度控制器

含水率的测定方法为将物料放入 105℃ 干燥箱,定时称量,直至连续两次称量的质量不再发生变化时为止,计算其含水率,本试验均采用干基含水率。试验用新鲜金银花的干基含水率为 4. 6 ~ 4. 8。

1.4 水分比

物料水分比的计算式为^[11]

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \tag{1}$$

式中 M_t ——物料在 t 时刻的含水率

M_0 、 M_e ——物料的初始、平衡含水率

由于 M_e 相对于 M_t 和 M_0 很小,通常在工程应用中常忽略不计,因此,物料水分比的计算采用简化式^[12],即

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \tag{2}$$

1.5 数学模型

许多学者通过试验研究,总结出了一些常用的经验、半经验模型来描述物料干燥情况,如指数模型^[13]、Page 模型^[14]、Modified Page 模型^[15]等。本试验通过把干燥过程的水分比曲线线性化,来确定金银花的干燥模型方程。

数据分析和处理采用 DPS V3. 01 专业版统计分析软件。

模型的精度验证采用决定系数 R^2 、平均偏差 (mean bias error) M_{BE} 和均方根误差 (root mean square error) R_{MSE} 等指标^[16],其中

$$M_{BE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{R,exp,i} - M_{R,pre,i}) \tag{3}$$

$$R_{MSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{R,exp,i} - M_{R,pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中 N ——试验点数目

$M_{R,exp}$ 、 $M_{R,pre}$ ——实测、预测水分比

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 辐射板温度

在干燥室压力 3 000 Pa 和物料量 40 g 时,不同辐射板温度的金银花水分比曲线如图 2 所示。由图可知干燥时间随着板温的升高而减少。

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,辐射板发射能力为

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \tag{5}$$

式中 E ——发射能力, W/m^2 ε ——黑度

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数,取 $5. 67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T ——绝对温度, K

由式(5)可知,发射能力与绝对温度的四次方

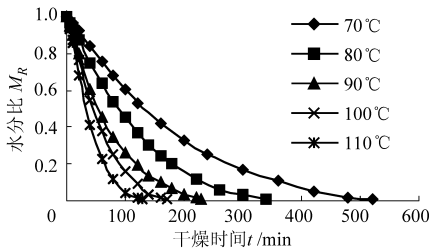


图2 辐射板温度对水分比曲线的影响曲线
Fig. 2 Influence of radiation heater's temperature on moisture ratio curves

成正比。因此,辐射板温度越高,发射能力、传递给物料的热流量、水分的扩散和蒸发速度就越大,干燥时间就越短。当辐射板温度为 110℃ 时,需 130 min 就达到了干燥终点,但干燥制品中有小部分金银花的细端开始变灰。这是由于金银花中的叶绿素和绿原酸含量较高,这两种成分是金银花绿色的主要显色物质,都具有一定的热敏性,当板温为 110℃ 时,干燥结束时物料表面温度达到 81.5℃,虽然干燥时间很短并且在真空情况下干燥,但是依然可能有部分的叶绿素和绿原酸受到破坏,导致了一些褐变。当辐射板温度为 70℃ 时,由于温度较低,传给物料的热流量也少,导致干燥速率较低,需要 520 min 才达到干燥要求。如果降低板温,则需要更长干燥时间。因此,辐射板温度最好在 70 ~ 110℃ 的范围内。

2.1.2 干燥室压力

在辐射板温度 100℃ 和物料量 40 g 时,干燥室压力对水分比的影响如图 3 所示。从 800 Pa 到 40 000 Pa 跨度很大,但干燥时间差别不大,在 150 ~ 200 min 的范围内,虽然干燥时间随着压力的降低而减少,但影响不大。金银花内部花蕊中的水分需要先扩散到表面,再变成蒸汽,依靠蒸汽压差进入空间并被抽走。压力对干燥时间的影响不大,说明金银花真空远红外辐射干燥过程中水分迁移和气化的主要影响因素是内部扩散阻力。干燥快结束时,若取出物料,会发现虽然一些金银花的表面很干,一捏就碎,但其内部的花蕊的湿度还较大,同样说明了干燥时物料中水分的内部扩散阻力很大,花蕊的水分扩散到表面较难,而压力对物料内部的水分扩散影响较小。压力过低时,运行成本将增大,压力高时,容易造成水分蒸发的压力差过小而导致干燥不彻底,因此,确定随后试验的压力范围为 800 ~ 12 000 Pa。

2.1.3 物料量

在辐射板温度 90℃ 和干燥室压力 5 500 Pa 时,不同物料量的水分比曲线如图 4 所示。在正对辐射板的物料盘的面积上,铺一层物料需要金银花 40 g,因此,80 g 和 120 g 的物料量可视为 2 层和 3 层物

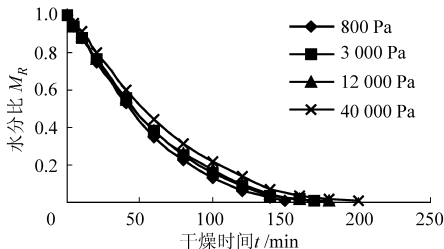


图3 干燥室压力对水分比曲线的影响曲线
Fig. 3 Influence of pressure on moisture ratio curves

料。由图可知,随着物料量的增加,物料层厚度增加,干燥时间明显变长。由于是采用远红外单向辐射加热,而远红外线一般只能透入物料 1 ~ 3 mm^[6],因此在真空情况下,要透入穿透厚度以下,热量传递只能通过传导,而物料层越厚,热传导的阻力越大,传热效率越低,干燥时间就越长。所以,在金银花真空远红外辐射干燥中,物料量不能太多。

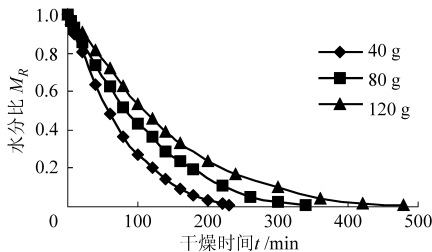


图4 物料量对水分比曲线的影响曲线
Fig. 4 Influence of sample mass on moisture ratio curves

2.2 金银花真空远红外辐射干燥模型建立

2.2.1 模型的确立

对单因素试验数据处理后,作出 $\ln(-\ln M_R)$ 与 $\ln t$ 的关系图,如图 5 ~ 7 所示。由图可以看出,3 个图中的 $\ln(-\ln M_R)$ 和 $\ln t$ 均呈非常好的线性关系,所有试验的 R^2 均在 0.985 ~ 0.998 的范围内。因此,本文采用的线性方程为

$$\ln(-\ln M_R) = \ln K + n \ln t \tag{6}$$

式中 K, n ——参数

将上式求两次幂,得到的 Page 模型^[13]为

$$M_R = \exp(-Kt^n) \tag{7}$$

该方程即为本试验采用的模型方程。

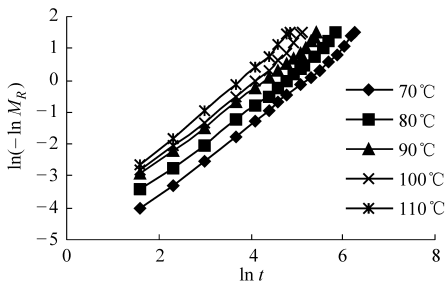


图5 不同辐射板温度下的 $\ln(-\ln M_R) - \ln t$ 曲线
Fig. 5 Curves of $\ln(-\ln M_R)$ vs $\ln t$ at different temperatures of the radiation heater

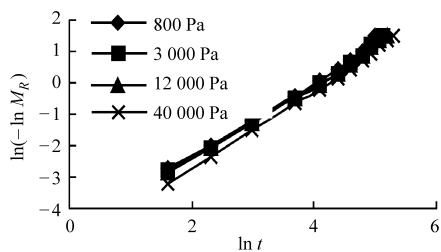


图 6 不同压力下的 $\ln(-\ln M_R)-\ln t$ 曲线

Fig. 6 Curves of $\ln(-\ln M_R)$ vs $\ln t$ under different pressures

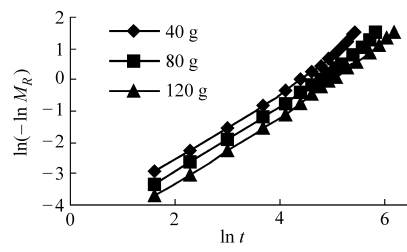


图 7 不同物料量下的 $\ln(-\ln M_R)-\ln t$ 曲线

Fig. 7 Curves of $\ln(-\ln M_R)$ vs $\ln t$ of different sample masses

2.2.2 模型参数的确立

将三元二次正交回归试验的结果进行 $\ln(-\ln M_R)$ 和 $\ln t$ 的变换,再进行线性回归,得到的 n 和 $\ln K$ 值

以及线性回归的决定系数 R_1^2 如表 2 所示。 R_1^2 均在 0.99 之上,可见所有的试验结果经过变换后,均呈良好的线性关系。

表 2 二次回归正交试验结果及模型值和实测值的比较

Tab.2 Results of quadratic orthogonal regression and comparison between modeling data and experimental data									
试验 序号	X_1	X_2	X_3	线性回归参数和 R^2			模型值和实测值的比较指标		
				n	$\ln K$	R_1^2	R_2^2	M_{BE}	R_{MSE}
1	1	1	1	1.217 5	-5.576 7	0.997 5	0.993 5	-0.006 020	0.007 081
2	1	1	-1	1.188 7	-4.978 1	0.996 0	0.992 4	-0.007 560	0.008 879
3	1	-1	1	1.206 2	-5.421 5	0.995 4	0.992 1	0.004 926	0.007 540
4	1	-1	-1	1.184 3	-4.948 8	0.995 5	0.988 5	0.008 485	0.010 681
5	-1	1	1	1.079 1	-5.439 5	0.995 0	0.991 0	-0.008 260	0.009 874
6	-1	1	-1	1.199 8	-5.540 3	0.995 5	0.994 4	-0.002 520	0.005 895
7	-1	-1	1	1.074 4	-5.404 7	0.995 7	0.990 0	0.010 020	0.012 561
8	-1	-1	-1	1.198 4	-5.448 9	0.996 0	0.991 2	0.008 306	0.009 342
9	-1.682	0	0	1.120 5	-5.684 2	0.995 9	0.993 0	0.005 167	0.007 44
10	1.682	0	0	1.249 4	-5.423 8	0.996 3	0.996 2	-0.001 780	0.004 348
11	0	-1.682	0	1.128 6	-4.843 7	0.996 7	0.988 4	0.008 299	0.010 338
12	0	1.682	0	1.131 0	-5.102 6	0.998 4	0.996 4	-0.005 320	0.008 649
13	0	0	-1.682	1.205 7	-5.050 7	0.993 5	0.992 6	-0.001 670	0.005 823
14	0	0	1.682	1.153 4	-5.636 5	0.997 4	0.994 7	-0.001 650	0.005 825
15	0	0	0	1.132 2	-5.229 4	0.994 8	0.991 0	0.005 227	0.008 188
16	0	0	0	1.123 5	-5.155 2	0.999 5	0.995 6	-0.001 740	0.005 115
17	0	0	0	1.136 1	-5.226 2	0.996 1	0.992 6	0.003 083	0.007 826
18	0	0	0	1.130 8	-5.234 1	0.998 2	0.990 8	0.005 440	0.009 484
19	0	0	0	1.127 0	-5.132 7	0.997 9	0.993 1	-0.000 250	0.006 080
20	0	0	0	1.125 1	-5.138 7	0.997 7	0.992 9	0.003 440	0.007 324

将正交试验得到的 n 和 $\ln K$ 用 DPS 软件进行拟合,得到参数的拟合方程为

$$\begin{aligned} n = & 1.129\,1 + 0.033\,8X_1 + 0.002\,X_2 - 0.020\,6X_3 + \\ & 0.001\,2X_1X_2 + 0.036\,9X_1X_3 + 0.001\,3X_2X_3 + \\ & 0.019\,8X_1^2 + 0.001\,6X_2^2 + 0.0179X_3^2 \end{aligned} \tag{8}$$
$$\begin{aligned} \ln K = & 5.184\,5 + 0.098\,6X_1 - 0.054\,6X_2 - \\ & 0.14X_3 - 0.007\,3X_1X_2 - 0.152X_1X_3 - \\ & 0.008\,7X_2X_3 - 0.140\,2X_1^2 + \\ & 0.065\,1X_2^2 - 0.065\,9X_3^2 \end{aligned} \tag{9}$$

利用计算机对回归方程的拟合情况进行检验,模型 $F_R^{(n)} = 80.22$, $F_R^{(\ln K)} = 26.66$,均大于 $F_{0.01}^{(9,10)} = 4.94$, $P_r < 0.000\,1$,说明回归是显著的。失拟 $F_{Lf}^{(n)} = 4.15$, $F_{Lf}^{(\ln K)} = 2.71$,均小于 $F_{0.05}^{(5,5)} = 5.05$,说明拟合不足是不显著的,因此该模型是合适的,与金银花的真空远红外辐射干燥过程吻合。

利用 F 检验对方程回归系数进行检验,将差异不显著项剔除,可得 n 和 K 的回归方程为

$$\begin{aligned} n = & 1.130\,8 + 0.033\,8X_1 - 0.020\,6X_3 + \\ & 0.036\,9X_1X_3 + 0.019\,7X_1^2 + 0.017\,8X_3^2 \end{aligned} \tag{10}$$

$$K = \exp(-5.1844 + 0.0986X_1 - 0.0546X_2 - 0.14X_3 - 0.152X_1X_3 - 0.1403X_1^2 + 0.0651X_2^2 - 0.0659X_3^2)$$

(11)

利用式(7)、式(10)和式(11)计算各组试验的 M_R 变化情况,并将模型值和试验值进行比较,结果如表 2 所示。可以看出,绝大部分的 R^2_2 都在 0.99 之上,所有 M_{BE} 均小于 0.01,绝大部分 R_{MSE} 均小于 0.01,因此,检验指标均符合预期,该模型和试验结果的匹配精度较高。

2.2.3 模型的预测性检验

为检验模型的预测性,又在回归试验之外进行了 4 组试验,并用模型方程进行了计算,4 组试验的工艺参数如表 3 所示。实测值和模型预测值的比较如表 3 和图 8 所示。

表 3 模型的预测性检验结果

Fig.3 Prediction testing of the model

试验 序号	辐射板 温度/℃	干燥室 压力/Pa	物料 量/g	R^2	M_{BE}	R_{MSE}
1	95	5 500	91.9	0.995 7	0.000 457	0.008 046
2	95	5 500	68.1	0.992 4	-0.005 170	0.008 606
3	85	5 500	91.9	0.994 3	0.002 988	0.005 917
4	85	5 500	68.1	0.995 9	-0.001 560	0.004 157

由表可知,所有的指标均符合预期要求,由图可以看出,实测值和预测值匹配良好。

将 $X_j = \frac{x_j - x_{0j}}{\Delta_j}$ 代入上述的编码方程,可得到用自变量真实值表示的 M_R 回归模型方程为

$$M_R = \exp(-Kt^n)$$

(12)

其中

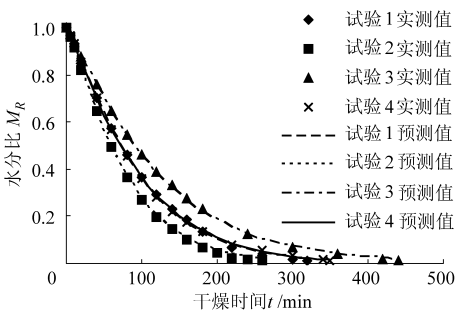


图 8 实测值和预测值的比较

Fig.8 Comparison of the experimental data and the predicted data

$$n = 3.8409 - 0.0451x_1 - 0.02x_3 + 0.00016x_1x_3 + 0.0002x_1 + 0.000032x_3^2$$

$$K = \exp(-21.9729 + 0.314x_1 - 0.00011x_2 + 0.0702x_3 - 0.00064x_1x_3 - 0.0014x_1^2 + 8 \times 10^{-9}x_2^2 - 0.00011x_3^2)$$

该模型的适用范围为: $73.2^{\circ}\text{C} \leq x_1 \leq 103.8^{\circ}\text{C}$, $800\text{ Pa} \leq x_2 \leq 102\,00\text{ Pa}$, $40\text{ g} \leq x_3 \leq 120\text{ g}$ 。

3 结论

- (1) 随着辐射板温度的上升、压力的下降和物料量的减少,金银花真空远红外辐射干燥的干燥时间减少,但压力的影响相对较小,而辐射板温度过高和过低均不利于干燥。
- (2) 建立了金银花真空远红外辐射干燥的动力学模型方程为 $M_R = \exp(-Kt^n)$,并确立了参数 n 和 K 的表达式。该模型考虑了辐射板温度、干燥室压力和物料量等参数。经验证,该模型的拟合精度较高,能很好地表达和预测金银花真空远红外辐射干燥的水分比变化规律。

参 考 文 献

1 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

2 肖宏儒,王立富,吴家兵. 微波干燥技术在金银花烘干中的应用研究[J]. 食品科学,2001,22(5):41~43.
Xiao Hongru, Wang Lifu, Wu Jiabing. Study on application of microwave technology in the drying of honeysuckle[J]. Food Science, 2001, 22(5):41~43. (in Chinese)

3 彭菊艳,龚月桦,王俊儒. 不同干燥技术对金银花药用品质的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(10):2 044~2 050.
Peng Juyan, Gong Yuehua, Wang Junru. Influence of different drying technologies on the medical quality of honeysuckle[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(10):2 044~2 050. (in Chinese)

4 吉永奇,朱文学. 金银花干燥工艺试验研究[J]. 食品科技,2008,33(6):39~42.
Ji Yongqi, Zhu Wenxue. Experimental study on the drying technique of *Flos Lonicerae*[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(6):39~42. (in Chinese)

5 王相友,操瑞兵,孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报,2007,38(7):177~182.
Wang Xiangyou, Cao Ruibing, Sun Chuazhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177~182. (in Chinese)

6 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.

- 10 李冰,郭祀远,李琳,等. 人工神经网络在食品工业中的应用[J]. 食品科学,2003,24(6):161~164.
Li Bing, Guo Siyuan, Li Lin, et al. Application of artificial neural networks in food industry [J]. Food Science, 2003, 24(6):161~164. (in Chinese)
 - 11 Razavi M A, Mortazavi A, Mahmoud Mousavi. Dynamic modeling of milk by artificial neural network [J]. Journal of Membrane Science,2003,220(1~2):47~58
 - 12 陆冬娜,杨马英. 基于 RBF 神经网络的非线性模型预测控制[J]. 浙江工业大学学报,2007,35(2):123~126.
Lu Dongna, Yang Maying. Nonlinear model predictive control based on RBF networks [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(2):123~126. (in Chinese)
 - 13 吴琼英,马海乐,骆琳,等. 高效液相色谱法测定血管紧张素转化酶抑制剂的活性[J]. 色谱,2005,23(1):79~81.
Wu Qiongying, Ma Haile, Luo Lin, et al. Determination of angiotensin converting enzyme inhibitor activity by high performance liquid chromatography [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2005, 23(1):79~81. (in Chinese)
 - 14 王福荣. 生物工程分析与检验[M]. 北京:中国轻工业出版社,2005:204~207.
 - 15 Antonio Bódalo, José L Gómez, Elisa Gómez, et al. Study of L-aminoacylase deactivation in an ultrafiltration membrane reactor [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2004, 35(2):261~266.
 - 16 李文,马海乐,王金斌. 酶解反应与膜分离耦合连续制备紫菜降压肽[J]. 食品科技,2008(10):71~75.
Li Wen, Ma Haile, Wang Jinbin. Continuous preparation of antihypertensive peptides from *Porphyra yezoensis* by coupling enzymatic hydrolysis with membrane separation [J]. Food Science and Technology, 2008(10):71~75. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 109 页)

- 7 Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(2):147~156.
- 8 Swasdisevi T, Devahastin S, Sa-adchom P. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 100~106.
- 9 徐凤英,李长友,陈震. 荔枝在不同红外辐射源下真空干燥优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 147~150, 106.
Xu Fengying, Li Changyou, Chen Zhen. Optimization test of Litchi vacuum drying under different infrared radiation sources [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 147~150,106. (in Chinese)
- 10 刘云宏,朱文学,马海乐. 地黄真空红外辐射干燥模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1):122~126.
Liu Yunhong, Zhu Wenxue, Ma Haile. Modeling of vacuum infrared radiation drying on *Rehmanniae*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):122~126. (in Chinese)
- 11 Midilli A. Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system [J]. International Journal Energy Research, 2001, 25(8):715~725.
- 12 Hasan Togrul. Suitable drying model for infrared drying of carrot[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3):610~619.
- 13 Liu Q, Bakker-Arkema F W. Stochastic modeling of grain drying. Part 2: model development[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(4):275~280.
- 14 Page G E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[D]. West Lafayette: Purdue University, 1949.
- 15 White G M. Fully exposed drying of popcorn[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(3):466~468.
- 16 Hasan Togrul. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005,71(3): 311~323.