

文章编号:0253-4339(2015)03-0108-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.03.108

黄粉虫热泵低温干燥特性及干燥数学模型

薛雅萌 李保国

(上海理工大学食品科学与工程研究所 上海 200093)

摘 要 为了研究生物材料热泵低温干燥特性,以黄粉虫为干燥材料,研究了不同干燥温度、风速和漂烫时间对黄粉虫干燥特性的影响,并选用常用的干燥模型对实验结果进行拟合。结果表明:黄粉虫热泵低温干燥可分为加速干燥段、恒速干燥段和降速干燥段。提高热泵低温干燥的风温、风速以及增加漂烫时间均有利于缩短干燥时间。采用 Midilli 干燥模型拟合实验数据的平均 R^2 值最大,平均 RMSE 和 SEE 值最小,分别为 0.99971、0.00559 和 0.00104,是描述黄粉虫热泵低温干燥的最优模型。

关键词 热泵低温干燥;水分比;干燥速率;数学模型

中图分类号:TS205.1;TQ051.8⁺92

文献标识码:A

Drying Characteristics and Mathematical Model for Heat Pump Low Temperature Drying of Tenebrio Molitor

Xue Yameng Li Baoguo

(Institute of Food Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract In order to study the heat pump low temperature drying characteristics of biological material, the tenebrio molitors, as drying materials, was dried with heat pump under the conditions of different air temperatures, air velocities and blanching time. The drying characteristics of tenebrio molitors were studied and the drying processing was correlated by typical drying model. The results show that the drying process of tenebrio molitor could be divided into three stages, i. e., acceleration drying period, constant-rate drying period and falling rate drying period. The drying time can be shortened with the increasing of air temperature, air velocity and blanching time. An optimum model was chosen based on their coefficients of determination R^2 , root mean square error (RMSE) and sum of squared error (SSE). It is shown that the Midilli model was superior to others in describing the drying curves of tenebrio molitors, and the R^2 , RMSE and SEE value respectively were 0.99971, 0.00559 and 0.00104. The experimental data of MR was in agreement with the predicted results of Midilli model.

Keywords heat pump low temperature drying; moisture ratio; drying rate; mathematical model

近年来,一些昆虫如蝇蛆、黄粉虫等新型高蛋白资源被开发利用,因此需要对这些鲜活虫子进行干燥,如何提高干燥效率,保证干燥后成品的营养和质量,是一个亟待解决的问题。黄粉虫是一种高蛋白的生物体,它不仅在食品中作为添加剂,用来增加食品的营养价值,同时还作为高蛋白的饲料广泛用于蝎子、蜈蚣等的养殖,黄粉虫含有丰富的不饱和脂肪酸,不仅能提高皮肤的抗皱功能,同时具有补气养血的作用,具有极好的药用价值。目前黄粉虫的干燥多为热风干燥,极易造成营养物质的流失,因此本文采用热泵低温干燥方法对黄粉虫进行干燥,较好的保留黄粉虫的品质和色泽。

热泵干燥过程中由干燥室排出的低温高湿空气经热泵装置除湿后,成为高温低湿空气再进入干燥

室,如此循环利用热能使物料脱水,提高了热能利用效率。与其他干燥装置相比,热泵干燥具有热效率高、节能、干燥温度较低、脱水效率高和卫生安全等特点^[1-2],尤其适合于营养丰富的热敏性产品的干燥。早期被广泛应用于化学工业、造纸、木材、纺织、制药等行业,近几年来已开始应用到食品干燥加工领域。

本文选用黄粉虫为实验材料,研究黄粉虫热泵低温干燥特性,并得出黄粉虫热泵低温干燥的最佳数学模型,为该技术应用黄粉虫热泵干燥提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为活体黄粉虫,采购于花鸟市场。黄粉虫平均直径为 3 mm,长度为 3.5 cm。

1.2 实验设备

QS-500 热泵低温干燥实验装置(上海绿原制冷设备有限公司)、TQP WB-20001XA 色差仪(北京新恒能分析仪器有限公司)、FA1604 电子天平(上海精密科学仪器有限公司)、安捷伦 34970A 采集仪(安捷伦科技有限公司)。实验装置如图 1 所示。

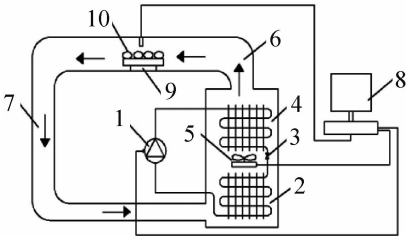


图 1 热泵低温干燥实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat pump low temperature drying experimental device

该实验装置是一个闭环系统。经热泵产生的干燥空气,在风机推动下进入干燥室与物料进行热湿交换,吸收物料中的水分,变为低温湿空气,进入热泵蒸发器。在蒸发器中,湿空气被冷却至露点温度以下,凝结出水分,变为低温干燥空气,进入热泵冷凝器,低温干燥空气被加热至 45~65℃后,在风机的作用下进入干燥室,如此循环实现物料干燥。

1.3 实验方法

根据预实验结果,选取风温、风速漂烫时间为实验因素,实验设计如表 1 所示。

表 1 实验设计和实验参数
Tab. 1 Test design and test parameters

序号	干燥温度/℃	风速/(m/s)	漂烫时间/s
1	40	4	30
2	50	4	30
3	60	4	30
4	50	2	30
5	50	3	30
6	50	4	15
7	50	4	45

实验开始前将干燥机调整到设定的风温、风速,预热 30 min。将黄粉虫在 95℃热水中漂烫规定时间,取出后放在过滤网上平铺自然晾干 15 min 去除

表面的自由水,然后放置在实验托盘中进行实验,每隔 15 min 记录一次样品的重量变化,直至达到设定的含水率。

M_t 按式(1)计算:

$M_t = (W_t - G)/G$ (1)

式中: W_t 为干燥至任意干燥 t 时刻的质量,g; G 为干物质质量,g。

水分比 MR 按式(2)计算:

$MR = (M_t - M_e)/(M_0 - M_e)$ (2)

式中: M_0 为初始干基含水率,g/g; M_e 为干燥到平衡时的干基含水率,g/g; M_t 为任意干燥 t 时刻的干基含水率,g/g。由于平衡干基含水率 M_e 远小于 M_0 和 M_t ,公式(2)可以简化为公式(3):

$MR = M_t/M_0$ (3)

干燥速率 DR(Drying Rate)按式(4)计算:

$DR = (M_{t_i} - M_{t_{i+1}})/\Delta t$ (4)

式中:DR 为干燥速率,g/(g·h); $M_{t_{i+1}}$ 为 t_{i+1} 时刻的干基含水率,g/g。 M_{t_i} 为 t_i 时刻的干基含水率,g/g; Δt 为 t_{i+1} 与 t_i 时刻的时间差,h。

1.4 干燥数学模型

物料干燥是一个复杂的热质传递过程,同时又与物料的物理特性密切相关。前人通过不同物料的干燥实验研究,总结了多个理论、半理论和经验数学模型用于描述干燥过程中物料水分比随时间的变化规律。根据前期拟合结果,筛选出 3 个常用的薄层干燥模型进行黄粉虫热泵低温干燥数学模型研究^[3-4]。如表 2 所示。

表 2 薄层干燥数学模型
Tab. 2 Mathematical model of drying

模型序号	模型名称 ^[2]	模型表达式
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
2	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
3	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

干燥模型拟合程度的优劣由决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和误差平方和(SEE)决定。 R^2 越大,RMSE 和 SEE 越小,说明拟合程度越好^[5-6]。 R^2 、RMSE 和 SEE 分别定义为:

$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - \overline{MR_{exp}})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2}$ (5)

$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$ (6)

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (7)$$

式中: $MR_{exp,i}$ 为实测水分比; $MR_{pre,i}$ 为预测水分比; $\overline{MR_{exp}}$ 为实验观测值的算术平均值; N 为实验测得数据的组数^[7-8]。

1.5 数据处理

采用 Origin 对数据进行处理和分析。并用 1stOpt 数据分析软件将数学模型的方程与实验数据进行多元非线性回归拟合。

2 结果与分析

2.1 风温对黄粉虫干燥特性的影响

图2和图3给出了在风速为4 m/s、漂烫时间为30 s的条件下,不同风温下黄粉虫的水分比和干燥速率的计算结果曲线。

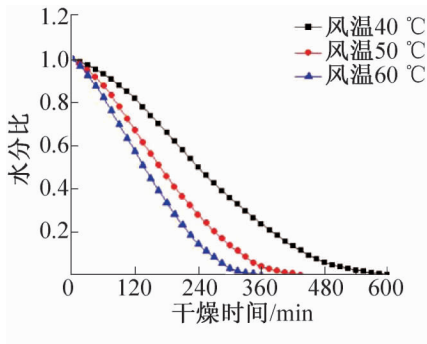


图2 风温对水分比的影响

Fig.2 Effect of temperature on moisture ratio

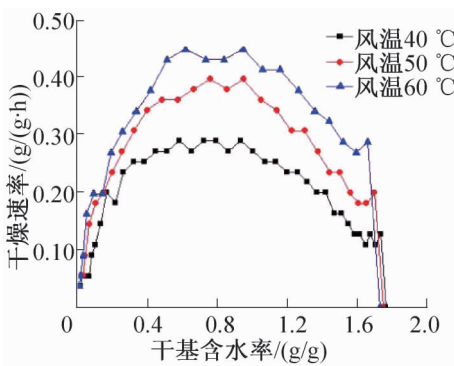


图3 风温对干燥速率的影响

Fig.3 Effect of temperature on drying rate

由图2可以看出黄粉虫的水分比随着干燥过程的进行呈下降趋势,干燥初期下降速度较快,干燥后期下降速度逐渐趋于平缓。在实验温度范围内,随着风温的增加,干燥时间显著缩短。干燥风温分别为40 °C、50 °C和60 °C条件下,黄粉虫的干燥时间分别为10 h、7.25 h和6 h。

由图3可以看出风温越高,黄粉虫的干燥速率越大。干燥进行1.5~2 h之间分别达到最大的干燥速率,持续短暂恒速阶段后进入降速阶段,这是由于随着干燥过程的进行,水分蒸发界面不断的向黄粉虫内部迁移,而水分迁移距离的增加,导致干燥速率的降低。干燥风温分别为40 °C、50 °C和60 °C条件下,黄粉虫的最大干燥速率分别为0.2883、0.3946和0.4464 g/(g·h)。

2.2 风速对黄粉虫干燥特性的影响

图4和图5给出了在风温为50 °C、漂烫时间为30 s条件下,不同干燥风速下黄粉虫的水分比和干燥速率的计算结果曲线。

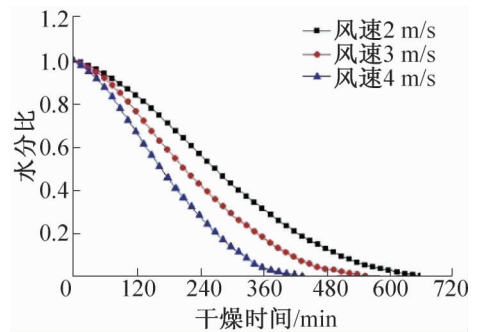


图4 风速对水分比的影响

Fig.4 Effect of wind velocity on moisture ratio

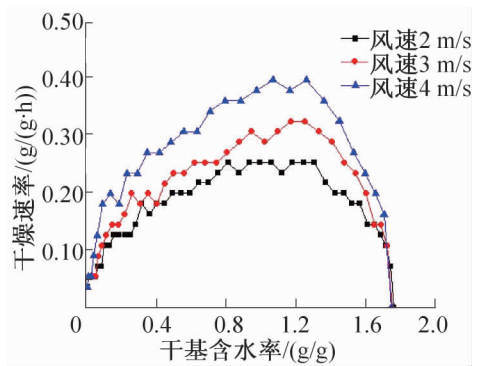


图5 风速对干燥速率的影响

Fig.5 Effect of wind velocity on drying rate

由图4可以看出黄粉虫的水分比随着干燥的进行呈下降趋势,干燥初期下降速度较快,干燥后期下降速度逐渐趋于平缓。在一定风速范围内(2~4 m/s),随着风速的增加可以有效缩短干燥时间,加快干燥过程。干燥风速分别为2 m/s、3 m/s和4 m/s条件下,黄粉虫的干燥时间分别为11 h、9.25 h和7.25 h。

由图5可以看出风速越高,黄粉虫的干燥速率就越大。干燥进行1.5~2 h之间分别达到最大的干燥

速率,持续短暂恒速阶段后进入降速阶段,这是由于干燥初期随着风温的增加,加速表面自由水的蒸发,随着干燥过程的进行,自由水所占的比例缩小,结合水的蒸发开始进行,风速的增加更有助于结合水的蒸发,因此干燥速率会随着风速的增加而加快。干燥风速分别为 2 m/s、3 m/s 和 4 m/s 条件下,黄粉虫的最大干燥速率分别为 0.2523、0.3049 和 0.3946 g/(g·h)。

2.3 漂烫时间对黄粉虫干燥特性的影响

图 6 和图 7 给出了在风温为 50 ℃、风速为 4 m/s 条件下,不同漂烫时间下黄粉虫的水分比和干燥速率的计算结果曲线。

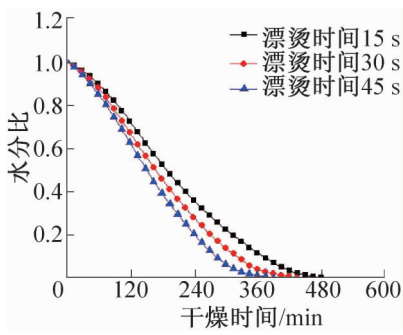


图 6 漂烫时间对水分比的影响

Fig. 6 Effect of blanching pretreatment time on moisture ratio

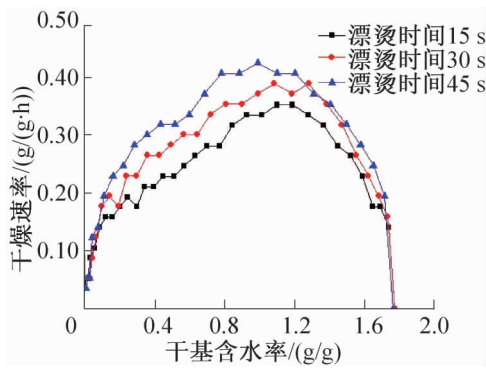


图 7 漂烫时间对干燥速率的影响

Fig. 7 Effect of blanching pretreatment time on drying rate

由图 6 可知对黄粉虫进行漂烫处理可以有效的缩短干燥时间,且随着漂烫时间的增加,所需的干燥时间就越短。在漂烫时间分别为 15 s、30 s 和 45 s 条件下,黄粉虫的干燥时间分别为 8 h、7.25 h 和 6.5 h。

由图 7 可以看出漂烫时间越长,黄粉虫的干燥速率就越大。干燥进行 1.5 ~ 2 h 之间分别达到最大的干燥速率,持续短暂恒速阶段后进入降速阶段,这是由于黄粉虫表皮排列紧密,且由于表皮的保护功能,不利于水分的蒸发。经过漂烫处理后,其表皮会产生

一些小裂纹,为水分蒸发提供通道,且经过漂烫使其细胞膜通透性增强,有利于细胞组织内部结合水的蒸发。在漂烫时间分别为 15 s、30 s 和 45 s 条件下,黄粉虫的最大干燥速率分别为 0.3571、0.3946 和 0.4305 g/(g·h)。

3 干燥模型的拟合

3.1 模型的选择

常用的干燥数学模型如表 2 所示。经过拟合得到各干燥模型参数值及 R^2 、RMSE 和 SEE 值如表 3 所示。所有模型的 $R^2 \geq 0.94827$, RMSE ≤ 0.10498 且 SEE ≤ 0.47411 。其中 Page 模型和 Midilli 模型的 $R^2 \geq 0.99765$, RMSE ≤ 0.01800 且 SEE ≤ 0.00810 ,说明这两个模型更适合用于描述黄粉虫热泵低温干燥过程。在这两个模型当中, Midilli 模型的 R^2 值更大,同时 RMSE 和 SEE 值更小,因此更适合用于描述热泵低温干燥的数学模型^[9-10]。

3.2 Midilli 模型的求解与验证

由表 3 可以得出 Midilli 模型更适于描述黄粉虫的热泵低温干燥。模型中干燥常数 k , a , n 和 b 是风温、风速和漂烫时间的函数。采用一次多项式来拟合上述常数^[11]。以干燥常数 k 为例,可表示为:

$$k = x_0 + x_1 T + x_2 \nu + x_3 \tau \quad (8)$$

式中: T 为干燥风温, ℃; ν 为干燥风速, m/s; τ 为漂烫时间, s; $x_0 \sim x_3$ 为常数。

根据实验中温度、风速和漂烫时间值对模型中 k , a , n 和 b 值进行线性回归分析,得到回归方程,结果如下:

$$k = -3.44 \times 10^{-4} + 6.74 \times 10^{-6} T + 3.43 \times 10^{-5} \nu - 6.97 \times 10^{-7} \tau \quad (R^2 = 0.93) \quad (9)$$

$$b = 1.72 \times 10^{-4} - 3.95 \times 10^{-6} T - 2.49 \times 10^{-5} \nu + 1.91 \times 10^{-7} \tau \quad (R^2 = 0.91) \quad (10)$$

其中:参数 a 和 n 线性回归拟合度较低, R^2 值分别为 0.76 和 0.81,回归不显著,则分别取表 3 中 Midilli 模型干燥常数 a 和 n 的平均值,分别为 0.98996 和 1.70936。因此 Midilli 模型方程为:

$$MR = a \exp(-kt^n) + bt \quad (11)$$

式中: $k = -3.44 \times 10^{-4} + 6.74 \times 10^{-6} T + 3.43 \times 10^{-5} \nu - 6.97 \times 10^{-7} \tau$; $b = 1.72 \times 10^{-4} - 3.95 \times 10^{-6} T - 2.49 \times 10^{-5} \nu + 1.91 \times 10^{-7} \tau$; $a = 0.98996$; $n = 1.70936$ 。

为了验证 Midilli 模型方程,选择风温为 50 ℃,风速为 4 m/s,漂烫时间为 30 s^[12]。比较水分比 MR 的实验值和 Midilli 模型的预测值。如图 8 所示。

表 3 黄粉虫薄层干燥数学模型拟合结果
Tab.3 The fitting results of tenebrio molitor thin-layer drying mathematical model

模型 序号	风温/ ℃	风速/ (m/s)	漂烫 时间/ s	干燥常数	决定系 数 R^2	均方根误差 RMSE	误差平方和 SEE
1	40	4	30	$k = 2.57 \times 10^{-5}, n = 1.86434$	0.99876	0.01320	0.00714
	50	4	30	$k = 7.94 \times 10^{-5}, n = 1.77614$	0.99825	0.01544	0.00715
	60	4	30	$k = 1.33 \times 10^{-4}, n = 1.74769$	0.99765	0.01800	0.00810
	50	2	30	$k = 2.43 \times 10^{-5}, n = 1.83808$	0.99873	0.01315	0.00778
	50	3	30	$k = 6.02 \times 10^{-5}, n = 1.74874$	0.99870	0.01306	0.00648
	50	4	15	$k = 7.69 \times 10^{-5}, n = 1.73970$	0.99815	0.01535	0.00778
	50	4	45	$k = 8.80 \times 10^{-5}, n = 1.79498$	0.99777	0.01766	0.00842
2	40	4	30	$a = -0.00232, b = 8.75 \times 10^{-7}$	0.98668	0.04620	0.08752
	50	4	30	$a = -0.00341, b = 2.21 \times 10^{-6}$	0.99007	0.04023	0.04854
	60	4	30	$a = -0.00426, b = 3.64 \times 10^{-6}$	0.99109	0.03766	0.03546
	50	2	30	$a = -0.00205, b = 6.45 \times 10^{-7}$	0.98820	0.04300	0.08319
	50	3	30	$a = -0.00269, b = 1.41 \times 10^{-6}$	0.99052	0.03979	0.06015
	50	4	15	$a = -0.00294, b = 1.54 \times 10^{-6}$	0.99169	0.03631	0.04351
	50	4	45	$a = -0.00382, b = 2.79 \times 10^{-6}$	0.98941	0.04097	0.04532
3	40	4	30	$k = 3.24 \times 10^{-5}, a = 0.98937, n = 1.80723, b = -6.96 \times 10^{-5}$	0.99979	0.00497	0.00101
	50	4	30	$k = 1.11 \times 10^{-4}, a = 0.99073, n = 1.69262, b = -1.19 \times 10^{-4}$	0.99970	0.00587	0.00103
	60	4	30	$k = 1.67 \times 10^{-4}, a = 0.98427, n = 1.67949, b = -1.49 \times 10^{-4}$	0.99947	0.00784	0.00154
	50	2	30	$k = 3.27 \times 10^{-5}, a = 0.99005, n = 1.76883, b = -7.27 \times 10^{-5}$	0.99991	0.00322	0.00047
	50	3	30	$k = 9.17 \times 10^{-5}, a = 0.99633, n = 1.65659, b = -8.71 \times 10^{-5}$	0.99981	0.00464	0.00082
	50	4	15	$k = 1.29 \times 10^{-4}, a = 0.99584, n = 1.62249, b = -1.35 \times 10^{-4}$	0.99980	0.00468	0.00072
	50	4	45	$k = 1.05 \times 10^{-4}, a = 0.98321, n = 1.73832, b = -1.28 \times 10^{-4}$	0.99946	0.00793	0.00169

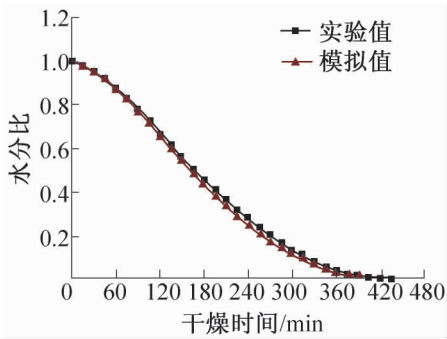


图 8 Midilli 模型的验证
Fig.8 Test of Midilli model

4 结论

1)黄粉虫的热泵低温干燥过程中,风温和风速对黄粉虫水分比和干燥速率的影响较大,干燥温度越高,风速越大,干燥所用时间就越短,干燥速率就越

快;漂烫时间对水分比和干燥速率的影响跟风温和风速相比略小,漂烫时间越长,干燥所用时间越短,干燥速率就越快。

2)黄粉虫热泵低温干燥过程中有明显的加速干燥阶段和降速干燥阶段,在物料达到最大干燥速率时有短暂的恒速干燥阶段。整个干燥过程降速干燥阶段占主要部分。

3)Midilli 和 Page 模型均能较好的模拟黄粉虫热泵低温干燥过程, Midilli 模型最佳。在实验条件范围内, Midilli 模型预测值与实验值拟合较好,且通过确定模型相关参数与风温、风速和漂烫时间的函数表达式,能准确预测任意时刻黄粉虫水分比的变化。

本文受上海市教委科研创新项目(14ZZ133)和上海市联盟计划(LM201337)资助。(The project was support by Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission (No. 14ZZ133)

and Alliance Program of Shanghai (No. LM201337).)

参考文献

- [1] 张雪娇,肖更生,唐道邦,等. 广式腊肉热泵薄层干燥数学模型研究[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 100-104. (Zhang Xuejiao, Xiao Gengsheng, Tang Daobang, et al. Mathematical modeling of thin layer heat pump drying of cantonese-style meat [J]. Food Science, 2013, 34(5): 100-104.)
- [2] 陈钟忍,吴平. 水产品热泵干燥装置的研究[J]. 制冷学报, 1992(1): 23-25. (Chen Zhongren, Wu Ping. Study of heat pump drying system for applied to sea food [J]. Journal of Refrigeration, 1992(1): 23-25.)
- [3] 刘坤,鲁周民,包蓉,等. 红枣薄层干燥数学模型研究[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 80-83. (Liu Kun, Lu Zhoumin, Bao Rong, et al. Mathematical modeling of thin-layer drying of red dates [J]. Food Science, 2011, 32(15): 80-83.)
- [4] Demir V, Gunhan T, Yagcioglu A K. Mathematical modeling of convection drying of green table olives[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 47-53.
- [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, 40(5): 110-114. (Shi Qilong, Zhao Ya, Li Zhaojie, et al. Mathematical modeling of heat pump drying of horse mackerel [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 110-114.)
- [6] Hii C L, Lawa C L, Suzannah S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108: 276-282.
- [7] 关志强,王秀芝,李敏,等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151-158. (Guan Zhiqiang, Wang Xiuzhi, Li Min, et al. Mathematical modeling of hot air drying of thin layer litchi flesh [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151-158.)
- [8] Mortaza A, Mohammad H K, Akbar A. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(5): 1348-1355.
- [9] 师建芳,吴辉煌,姜正,等. 豇豆隧道式热风干燥特性和模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 232-240. (Shi Jianfang, Wu Huihuang, Lou Zheng, et al. Drying characteristics and model of cowpea in tunnel hot air dryer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 232-240.)
- [10] 李栋,毛志怀,曹崇文. 低温下水稻的薄层干燥模[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 37-39. (Li Dong, Mao Zhihuai, Cao Chongwen. Study on thin layer drying model of paddy in low temperature [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(2): 37-39.)
- [11] 杨韦杰,唐道邦,徐玉娟,等. 荔枝热泵干燥特性及干燥数学模型[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 104-108. (Yang Weijie, Tang Daobang, Xu Yujuan, et al. Drying characteristics and mathematical modeling for heat pump drying of litchi [J]. Food Science, 2013, 34(11): 104-108.)
- [12] 李敏,关志强,刘兰. 二次回归分析法优化罗非鱼片热泵干燥过程的研究[J]. 制冷学报, 2011, 32(1): 58-62. (Li Min, Guan Zhiqiang, Liu Lan. Optimization of heat pump drying process of tilapia fillet by secondary multiple regression analytical method [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(1): 58-62.)

作者简介

李保国,男,教授,博士生导师,上海理工大学食品科学与工程研究所,(021)55271290,E-mail:lbaoguo@126.com。研究方向:食品和农产品加工新技术(冷却、保鲜、干燥等)。

About the author

Li Baoguo, male, professor, Ph. D., Institute of Food Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55271290, E-mail:lbaoguo@126.com. Research fields: the new processing techniques for food and agricultural products (cooling, preservation, drying, et al).