

地黄真空红外辐射干燥质热传递分析*

刘云宏 朱文学 刘建学

(河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471003)

【摘要】 以 Fourier 方程和 Fick 定律为基础,建立了地黄真空红外辐射干燥过程传热、传质的数学模型。通过理论推导和试验测定,确定了模型中有关参数的数值或方程。利用有限差分法进行了不同干燥条件下物料温度和含水率变化的数值模拟。结果表明:模拟值和试验值吻合较好,该模型可以较好地拟合地黄干燥过程中温度和含水率的变化,且能较好体现各干燥参数对干燥特性的影响情况。

关键词: 地黄 真空红外辐射干燥 传热 传质 数学模型

中图分类号: S567.23⁺4; TQ028.6⁺7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)10-0135-06

Mass and Heat Transfer Analysis of Vacuum Infrared Radiation Drying on *Rehmanniae*

Liu Yunhong Zhu Wenxue Liu Jianxue

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract

Mathematical model of mass and heat transfer about vacuum infrared radiation drying on *Rehmanniae* was built based on Fourier equation and Fick equation. The values or equation of model parameters were determined by theoretical analysis and experiments. By using finite difference method, mathematical simulations of sample temperature and moisture content under different drying conditions were carried out. The results showed that values of simulation and experiment fit well, the model could well simulate the changes of sample temperature and moisture content during drying and the influence of drying parameters on drying characteristics were illustrated by the model satisfactorily.

Key words *Rehmanniae*, Vacuum infrared radiation drying, Heat transfer, Mass transfer, Mathematical model

引言

在干燥过程中,不论采用哪一种干燥方法,将热量传递给物料并促使物料组织中水分向外转移是干燥的基本过程。因此,干燥过程中既有热的传递也有质(即水分)的外移,湿、热转移是干燥过程中的核心问题^[1]。通过干燥过程的传热、传质分析,可实现用数学方法来表达干燥过程中热量传递和质量传递,描述和预测物料干燥过程,确定试验难以测定的参数分布,实现对干燥过程的更深了解。

目前,有关真空红外辐射干燥质、热传递数学模

型的研究很少,且多是利用现有的经验模型来进行验证并确定其模型参数^[2-3],仅有少数通过质、热传递分析来建立真空红外辐射干燥数学模型^[4]的报道。Swasdisevi 等考虑了加热温度和物料厚度等参数,进行了香蕉的真空红外辐射干燥模型的理论研究,并建立物料传热、传质模型^[4]。徐凤英在荔枝真空红外辐射干燥的传热、传质分析中,考虑了果肉在干燥过程中的收缩,通过分析荔枝果壳、肉、核的相界面移动过程,构建了球状物料的真空红外辐射传热传质模型^[5]。

本文对地黄真空红外辐射干燥进行传热、传质

分析,以建立其质、热传递的数学模型,并利用有限差分法对模型进行求解。

1 数学模型

1.1 模型假设条件

本试验所用的真空红外辐射干燥设备结构及说明见文献[6]。物料坐标系建立如图1所示。

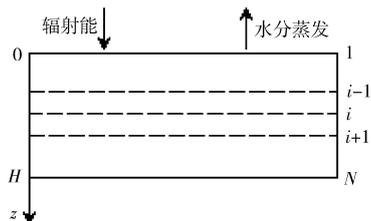


图1 坐标系建立及有限差分网格划分

Fig.1 Finite difference meshing diagram

在地黄真空红外辐射干燥过程中作如下假设:

- ①忽略干燥室和外界热交换。
- ②干燥室内压力保持恒定。
- ③物料内部的传热、传质均为沿厚度方向的一维传递。
- ④忽略物料侧面积对传热、传质的影响。
- ⑤物料在物料盘中分布均匀。
- ⑥不考虑水与物料的结合能。

1.2 传热模型

根据 Fourier 方程,可得

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (1)$$

初始条件

$$T_p = T_{p,0} \quad (t=0, 0 \leq z \leq H)$$

边界条件

$$\frac{\partial T_p}{\partial z} = 0 \quad (t > 0, z = H)$$

$$-\frac{\partial T_p}{\partial z} = \frac{\varepsilon_s \sigma (T_{IR}^4 - T_p^4)}{\lambda_p} + \frac{\alpha_H (T_{sh} - T_p)}{\lambda_p} +$$

$$\frac{\rho_p V_p \gamma \partial X}{\lambda_p A_p \partial t} \quad (t > 0, z = 0)$$

其中 $X = \frac{m}{m_0} (1 + X_0) - 1$ (2)

$$\rho_p = -0.0283X + 1.1107 \quad (3)$$

$$c_p = -0.1324X + 1.9857 \quad (4)$$

$$\lambda_p = -0.0428X + 0.3638 \quad (5)$$

$$A_p = (0.6271 + 0.1742X - 0.0192X^2) A_{p,0} \quad (6)$$

$$V_p = (0.2077 + 0.1075X + 0.0345X^2) V_{p,0} \quad (7)$$

$$H = (0.3283 + 0.0895X + 0.0284X^2) H_0 \quad (8)$$

式中 ρ_p ——物料密度, kg/m^3

c_p ——物料比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

T_p ——物料温度, K t ——时间, s

λ_p ——物料热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

H ——物料厚度, m A_p ——物料表面积, m^2

ε_s ——辐射板和物料的系统黑度

σ ——斯蒂芬-波尔兹曼辐射常数,

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

T_{IR} ——辐射板温度, K

α_H ——对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

T_{sh} ——干燥室温度, K

γ ——水的汽化潜热, J/kg

X ——干基含水率 V_p ——物料体积, m^3

下标 0 表示初始值。

1.3 传质模型

根据 Fick 第二扩散定律,可得地黄片内部水分扩散的控制模型为

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (9)$$

其中

$$D_{\text{eff}} = (-2.81396 + 0.13374T_{IR} - 1.00837 \ln p - 27.863L + 1188.84H) \times 10^{-10} \quad (10)$$

初始条件

$$X = X_0 \quad (t=0, 0 \leq z \leq H)$$

边界条件

$$\frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (t > 0, z = H)$$

$$D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial z} = \alpha_m (X - X_e) \quad (t > 0, z = 0)$$

式中 D_{eff} ——有效水分扩散系数, m^2/s

p ——干燥室压力, Pa

L ——辐射板和物料之间的距离, m

α_m ——传质系数, m/s

1.4 模型参数

1.4.1 辐射板和物料之间的系统黑度

地黄真空红外辐射干燥试验设备的辐射板和物料盘相对关系如图2所示。Crawford 采用环路积分法对两平行平板之间辐射角系数进行了详细推导,并建立其计算公式^[7]。对本试验来说,辐射板和物料盘的尺寸和面积相同,且均为正方形,即边长 $X_a = Y_a$,可得辐射角系数计算式^[8]为

$$X_{1,2} = \frac{2}{\pi X_L^2} \left[\ln \frac{(1 + X_L^2)^2}{1 + 2X_L^2} + 2X_L \sqrt{1 + X_L^2} \arctan \frac{X_L}{\sqrt{1 + X_L^2}} - 2X_L \arctan X_L \right] \quad (11)$$

其中 $X_L = \frac{X_a}{L}$

式中 X_a ——正方形辐射板的边长, m

辐射板对地黄的角系数 $X_{F,D}$ 应为辐射板对物料

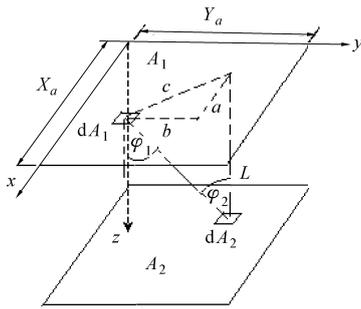


图 2 辐射板和物料盘的位置关系

Fig. 2 Position relationship between radiation heater and sample tray

盘的角系数 $X_{1,2}$ 乘以物料表面积和物料盘面积的比值。在地黄干燥过程中,物料上表面积不断收缩,辐射板和地黄之间角系数也不断发生变化,可以用两者初始角系数乘上面积收缩系数表示

$$X_{F,D} = \frac{(1-\beta)A_p}{A_2} X_{1,2} = (1-\beta)\varphi_A X_{1,2} \quad (12)$$

式中 A_2 ——物料盘面积, m^2

φ_A ——面积比系数

β ——面积收缩系数

辐射板黑度为 $\varepsilon_{IR} = 0.92$, 由厂家提供。由文献[8]可知,地黄表面黑度为 $\varepsilon_p = 0.74$ 。辐射板和地黄之间的辐射热阻采用网络算法[9]求得,等效网络如图 3 所示,其中 E_{b1} 、 E_{b2} 表示黑体辐射能力, J_1 、 J_2 表示实际灰体的有效辐射能力。可得辐射板和地黄之间的系统黑度 ε_s 为

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_{IR}}{\varepsilon_{IR}A_{IR}} + \frac{1}{A_{IR}X_{F,D}} + \frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p A_p}} \quad (13)$$

式中 A_{IR} ——辐射板面积, m^2

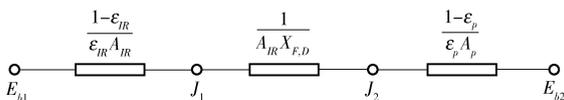


图 3 辐射板和地黄辐射换热等效网络

Fig. 3 Equivalent radioactive heating transfer between radiation heater and *Rehmanniae*

1.4.2 传热系数和传质系数

物料表面传热系数的计算式[8]为

$$\alpha_H = 35.975 \left(\frac{M_w}{RL} \frac{T_{IR} - T_1}{T_{IR} T_1} \right)^{0.37} \quad (14)$$

式中 M_w ——水分子量

T_1 ——物料上表面温度, K

R ——通用气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

根据希尔顿-科尔伯比拟定律[10],传质系数计算式为

$$\alpha_m = \frac{\alpha_H}{\rho_{sh} c_{sh} Le^{2/3}} = \frac{\alpha_H D_{\text{eff}}}{\lambda_{sh}} \quad (15)$$

式中 ρ_{sh} ——干燥室内气体密度, kg/m^3

c_{sh} ——室内气体比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Le ——路易斯数

λ_{sh} ——室内气体热导率, 取 $0.02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [11]

1.5 计算方法

利用有限差分法离散微分方程[12]。上表面为 $z=0$, 取层数 $i=1$, 下表面为 $z=H$, 取层数 $i=N$, 则 $X_{i,n+1}$ 表示物料中第 i 层中一点在第 $n\Delta t$ 时刻的干基含水率, $T_{p,i,n+1}$ 表示物料中第 i 层中一点在第 $n\Delta t$ 时刻的温度。

可知初始条件为

$$X_{i,1} = X_0$$

$$T_{p,i,1} = T_{p,0}$$

对物料内部的 $2 \sim N-1$ 层, 式(1)和式(5)分别离散为

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{p,i,n}}{\partial t} = \frac{T_{p,i,n+1} - T_{p,i,n}}{\Delta t} + 0(\Delta t) \\ \frac{\partial^2 T_{p,i,n}}{\partial z^2} = \frac{T_{p,i+1,n} - 2T_{p,i,n} + T_{p,i-1,n}}{\Delta z^2} + 0(\Delta z^2) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial X_{i,n}}{\partial t} = \frac{X_{i,n+1} - X_{i,n}}{\Delta t} + 0(\Delta t) \\ \frac{\partial^2 X_{i,n}}{\partial z^2} = \frac{X_{i+1,n} - 2X_{i,n} + X_{i-1,n}}{\Delta z^2} + 0(\Delta z^2) \end{cases} \quad (17)$$

因此, 可得

$$T_{p,i,n+1} = T_{p,i,n} + \frac{\lambda_p (T_{p,i-1,n} - 2T_{p,i,n} + T_{p,i+1,n})}{\rho_p c_p \Delta z^2} \Delta t \quad (18)$$

$$X_{i,n+1} = X_{i,n} + \frac{D_{\text{eff}} (X_{i-1,n} - 2X_{i,n} + X_{i+1,n})}{\Delta z^2} \Delta t \quad (19)$$

对边界层第 1 层和第 N 层, 计算式为:

$i=1$ 时

$$\begin{aligned} T_{p,1,n+1} &= T_{p,1,n} + \frac{\lambda_p (T_{p,2,n} - T_{p,1,n})}{\rho_p c_p \Delta z^2} \Delta t + \\ &\frac{\varepsilon_s A_p \sigma (T_{IR}^4 - T_p^4) + \alpha_H A_p (T_{sh} - T_{p,1,n}) - \rho_p V_p \alpha_m \gamma (X_{1,n} - X_e)}{A_p \rho_p c_p \Delta z} \Delta t \end{aligned} \quad (20)$$

$$X_{1,n+1} = X_{1,n} + \frac{D_{\text{eff}} (X_{2,n} - X_{1,n})}{\Delta z^2} \Delta t - \frac{\alpha_m (X_{1,n} - X_e)}{\Delta z} \Delta t \quad (21)$$

$i=N$ 时

$$T_{p,N,n+1} = T_{p,N,n} + \frac{\lambda_p (T_{p,N-1,n} - T_{p,N,n})}{\rho_p c_p \Delta z^2} \Delta t \quad (22)$$

$$X_{N,n+1} = X_{N,n} + \frac{D_{\text{eff}} (X_{N-1,n} - X_{N,n})}{\Delta z^2} \Delta t \quad (23)$$

取 $\Delta t \leq \frac{\Delta z^2}{2D_{\text{eff}}}$ 和 $\Delta t \leq \frac{\rho_p c_p \Delta z^2}{2\lambda}$ 两者的小值为步长 Δt 。

1.6 计算步骤

利用 Matlab 软件进行计算, 计算步骤如下:

①输入干燥初始条件、切片厚度及其划分层数。②对 $n=0$ 时的物料各参数赋初值。③计算有效水分扩散系数和初始系统黑度。④对时间以 Δt 为步长进行循环计算。⑤计算 $n\Delta t$ 时刻物料边界和内部各层的有关参数值。⑥利用各差分方程, 求出地黄片内部的温度分布和含水率分布。⑦返回步骤④, 进入 $(n+1)\Delta t$ 时刻。⑧对步骤④~⑦循环, 直至物料平均含水率小于 0.05 kg/kg (干基)

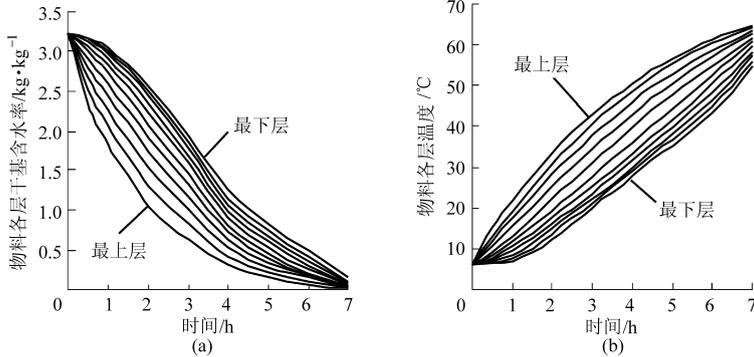


图4 物料各层干基含水率和温度变化的计算结果

Fig. 4 Calculated results of moisture content and temperature of each layer

(a) 干基含水率 (b) 温度

在干燥室压力 8 kPa , 物料厚度 6 mm , 辐射距离 0.10 m 条件下, 改变辐射板温度, 得到物料含水率和表面温度变化试验值和计算值的比较如图 5 所

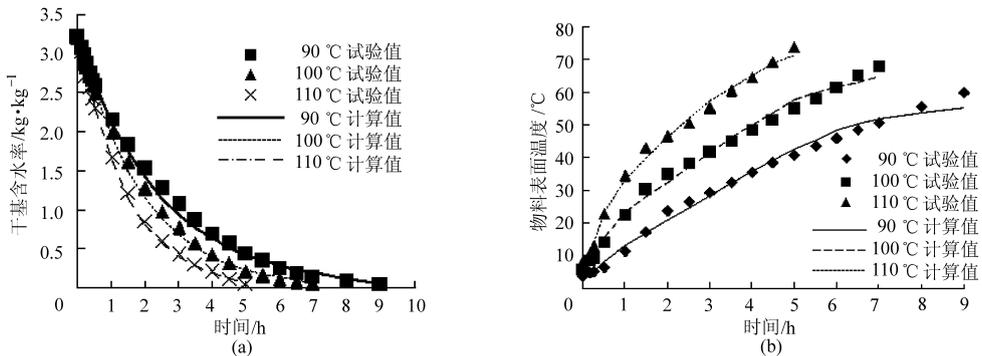


图5 不同辐射板温度下物料含水率和表面温度试验值和计算值比较

Fig. 5 Comparison of experimental and calculated data of moisture content and surface temperature in

different radiation heater's temperatures

(a) 干基含水率 (b) 物料表面温度

在辐射板温度 100°C , 干燥室压力 8 kPa , 辐射距离 0.10 m 条件下, 改变物料厚度, 干燥曲线和温度曲线变化如图 6 所示。物料越厚, 物料中水分向外扩散的阻力就越大^[14-15], 水分越难以从物料内部运动到表面并蒸发, 导致干燥速率下降, 所需干燥时间变长。物料温度变化和物料终温随着物料厚度的

为止。

2 计算结果与比较

在辐射板温度 100°C , 干燥室压力 8 kPa , 物料厚度 6 mm , 辐射距离 0.10 m 的干燥条件下, 忽略干燥初期短暂的抽真空阶段, 通过计算所得干燥过程中物料各层干基含水率和温度变化如图 4 所示。由图可知, 干燥前期物料表面含水率下降速度和温度上升速度均快于物料内部, 且在相同的时间点, 由物料表面到内部, 含水率逐渐升高, 温度逐渐降低。表明越往物料内部, 物料越难干燥, 但干燥终点各层的温度和含水率趋于一致。

示。辐射板温度越高, 表明提供给物料的辐射能越多^[13], 所需干燥时间越短, 失水速率越快, 物料温度升高速率越快, 干燥结束时物料终温也越高。

改变, 并无太大差别。

在辐射板温度 100°C , 干燥室压力 8 kPa , 物料厚度 6 mm 的条件下, 调节辐射距离, 得到物料含水率和表面温度变化试验值和计算值的比较如图 7 所示。辐射距离缩短, 可增大辐射板和物料之间的角系数^[16], 因此增加系统黑度, 物料可以接受更多的

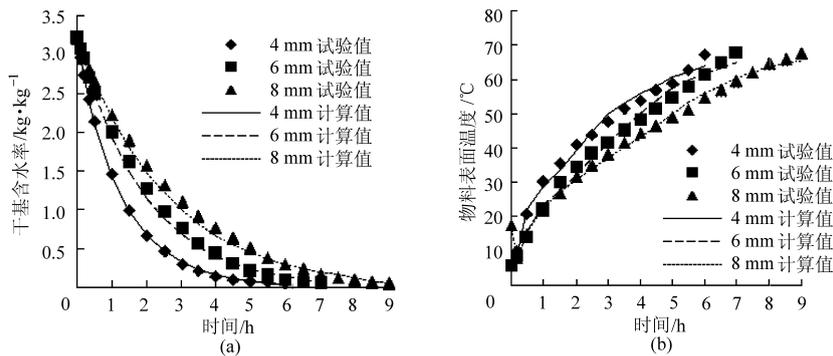


图 6 不同物料厚度下物料含水率和表面温度变化试验值和计算值比较

Fig. 6 Comparison of experimental and calculated data of moisture content and surface temperature in different sample's thicknesses

(a) 干基含水率 (b) 物料表面温度

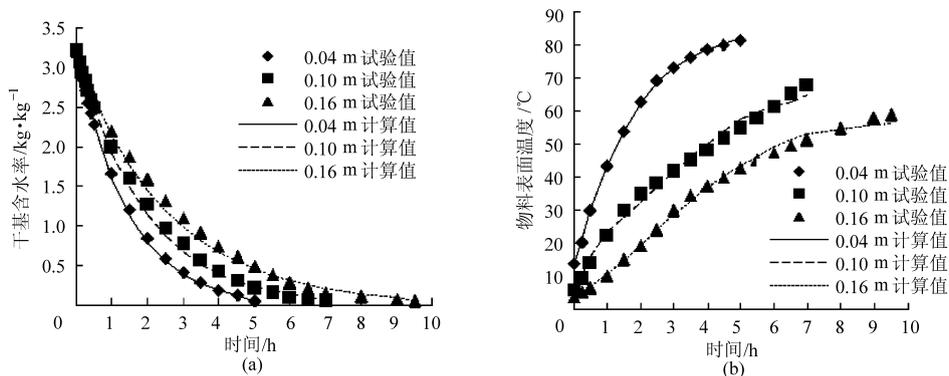


图 7 不同辐射距离下物料含水率和表面温度变化试验值和计算值比较

Fig. 7 Comparison of experimental and calculated data of moisture content and surface temperature in different radiation distances

(a) 干基含水率 (b) 物料表面温度

辐射能量,使物料所需干燥时间变短,物料温升速率明显变大,物料终温也有明显差别。

由图 5~7 可知,物料含水率和表面温度变化的试验曲线和模拟曲线拟合度较高。

3 结论

(1) 以 Fick 扩散定律和 Fourier 热平衡定律,建

立了地黄真空红外辐射干燥中物料含水率扩散模型和温度场模型。

(2) 采用有限差分法对地黄的传质方程和传热方程进行数值求解,模拟了地黄真空红外辐射干燥过程中含水率和温度变化。对含水率和表面温度变化的计算值与试验值进行比较,两者拟合良好,较好地反映了各参数对干燥特性的影响。

参 考 文 献

- 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 肖旭霖. 洋葱真空远红外薄层干燥模型[J]. 食品科学, 2002, 23(5): 40~43.
Xiao Xulin. Thin-layer modal of vacuum and far-infrared drying on onion [J]. Food Science, 2002, 23(5): 40~43. (in Chinese)
- 胡洁, 崔政伟. 胡萝卜远红外真空干燥试验参数的研究[J]. 食品科技, 2008, 33(2): 36~39.
Hu Jie, Cui Zhengwei. The research of far-infrared drying of carrot under vacuum conditions [J]. Food Science and Technology, 2008, 33(2): 36~39. (in Chinese)
- Swadisevi 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.
- 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
Xu Fengying. Study on mechanism heat and mass transfer in litchi vacuum & IR combined drying [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 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)
- 7 Crawford M. Configuration factor between two unequal paralalled,coaxial squares[C]. ASME Paper 72-WA/HT-16, 1972.
- 8 刘云宏. 中药材真空红外辐射干燥试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
Liu Yunhong. Experimental study on vacuum infrared radiation drying of Chinese herb[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 9 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
Wang Xibo. Theoretical analysis and experimental study on combined convective and infrared radiation drying[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 10 Lydersen A L. Handbook of chemical property estimation methods[M]. New York: McGraw-Hill Press, 1982.
- 11 高福成. 食品工程原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- 12 李庆阳, 莫孜中. 微分方程数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 13 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 Chuanzhu. 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)
- 14 Wu L, Orikasa T, Ogawa Y, et al. Vacuum drying characteristics of eggplants[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 422~429.
- 15 Junho L, Huijeong K. Vacuum drying kinetics of Asian white radish(*Raphanus sativus* L.) slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 180~186.
- 16 卢为开. 远红外辐射加热技术[M]. 上海: 上海科技出版社, 1982.

(上接第 109 页)

参 考 文 献

- 1 周强, 徐瑞清, 程小桐. 昆虫的生物光电效应与虫害治理应用[J]. 现代生物医学进展, 2006, 6(4): 70~72.
Zhou Qiang, Xu Ruiqing, Cheng Xiaotong. Bio-photo-electro effect of insects and its application in pest control [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2006, 6(4): 70~72. (in Chinese)
- 2 Farrow R A. A modified light-trap for obtaining large samples of night-flying locusts and grasshoppers [J]. Australian Journal of Entomology, 1974, 13(4): 357~360.
- 3 Jander, Barry. The phototactic push-pull-coupling between dorsal ocelli and compound eyes in the phototropotaxis of locusts and crickets [J]. Zeitschrift für Vergleichende Physiologie, 1968, 57(4): 432~458.
- 4 Andreas B, Marcel S, Rowell C. The perception of the visual flow field by flying locusts: a behavioral and neuronal analysis [J]. The Journal of Experimental Biology, 1992, 165(1): 137~160.
- 5 Bailey E V, Harris M O. The visual behavior of adult *Melanoplus sanguinipes* F. [J]. Journal of Insect Behavior, 1991, 4(6): 707~726.
- 6 Claire R F. Non-directional, movement sensitive neurons of the locust optic lobe [J]. Journal of Comparative Physiology A, 1987, 161(3): 477~494.
- 7 王荫长. 昆虫生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 450~451.
- 8 Vishnevskaya T M, Cherkasov A D. Spectral sensitivity of photorecypors in the compound eyes of the locust compound eyes [J]. Journal of Comparative Neurology, 1983, 33(2): 9~12.
- 9 Bayramoglu E S. The accelerating effect of mechanical vibrations on the positive phototaxis of *Locusta migratoria* [J]. Zeitschrift für Vergleichende Physiologie, 1969, 64(3): 351~354.
- 10 王立新, 周强. 基于猪笼草叶笼滑移区仿生的蝗虫捕集滑板功效测试[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 222~225.
Wang Lixin, Zhou Qiang. Function testing of locust slippery plate manufactured based on waxy zone of *Nepenthes* pitchers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 222~225. (in Chinese)
- 11 刘晓英, 焦学磊, 郭世荣, 等. 基于 LED 诱虫灯的果蝇趋光性试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 178~180.
Liu Xiaoying, Jiao Xuelei, Guo Shirong, et al. Experiment of light emitting diode catching insect lamp on phototaxis of drosophila [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 178~180. (in Chinese)