

# 微波干燥姜片模型建立与去水机理分析\*

吕为乔<sup>1</sup> 韩清华<sup>2</sup> 李树君<sup>2</sup> 周海军<sup>2</sup> 赵东林<sup>2</sup> 朱卫华<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 沈阳航天新阳速冻设备制造有限公司, 沈阳 110034)

**摘要:** 研究了姜片在单位质量微波功率 0.8、1.2、1.6 W/g(干基)条件下的干燥过程,拟合分析了微波流态化干燥姜片的数学模型,认为 Wang-Singh 模型最适合描述微波干燥姜片的降水过程。通过核磁共振(NMR)技术研究了姜片干燥过程中水分的流动特点,发现干燥过程中自由水很快转变成不易流动的束缚水,整个干燥过程以干燥束缚水为主;在最后阶段束缚水降低到一定程度,结合水含量增加;微波流态化干燥过程中去水不均的现象没有完全消除。研究为控制微波干燥姜片的降水过程和工艺优化提供了理论依据。

**关键词:** 姜片 微波干燥 模型 核磁共振 自由水 结合水

**中图分类号:** TS255.36; TQ028.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0233-05

## Analysis of Microwave Drying Model and Water Removing Mechanism of Ginger Slices

Lü Weiqiao<sup>1</sup> Han Qinghua<sup>2</sup> Li Shujun<sup>2</sup> Zhou Haijun<sup>2</sup> Zhao Donglin<sup>2</sup> Zhu Weihua<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Shenyang Aero Space Xinyang Quick Freezing Equip. Manuf. Co., Ltd., Shenyang 110034, China)

**Abstract:** The dehydration process of ginger slices at microwave power of 0.8, 1.2, 1.6 W/g (dry basis) was researched. The moisture content, drying speed and moisture ratios at different stages were calculated. Some drying mathematical models were selected, and by fitting analysis of the moisture ratios, Wang-Singh model can be used for dehydration process of ginger slices by microwave fluidized drying. Through the technology of nuclear magnetic resonance (NMR), the flow characteristics of moisture in ginger slices drying process were studied. A conclusion could be got that the free water can be converted to some uneasy flowing bound water in a short time, the whole drying process was dominated by drying bound water, and at the final stage the bound water was decreased to a certain extent and hydration water content increased, while uneven drying hadn't been eliminated completely in microwave fluidized drying. A theoretical basis for the process control and process optimization of ginger slices microwave drying was provided.

**Key words:** Ginger slices Microwave drying Model Nuclear magnetic resonance Free water Bound water

### 引言

微波流态化干燥生姜片,利用微波穿透性强,振

动流态化能控制受热均匀性等优势提高了生产效率,改善了干燥姜片的品质。探讨干燥过程的降水规律对控制工艺参数和产品品质有重要意义,国内

收稿日期: 2014-05-13 修回日期: 2014-06-20

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100802)和科研院所技术开发研究专项资金资助项目(2012EG119149)

作者简介: 吕为乔,博士生,主要从事农产品加工工程研究,E-mail: lvweiqiao@163.com

通讯作者: 李树君,研究员,博士生导师,主要从事高新技术在农副产品和食品加工中应用研究,E-mail: lisj@caams.org.cn

外不少学者研究过一些工艺干燥果蔬的降水过程。Togrul 研究了红外线干燥苹果片的干燥模型,认为 Midilli 公式表达效果最佳<sup>[1]</sup>。Wang 等研究了经过、未经过热风预干燥 2 种模式下微波干燥苹果渣的干燥模型,发现 Page 公式最适合描述这 2 种干燥过程<sup>[2]</sup>。在水分结合状态和流动性特点的研究方面,NMR 技术具有快速、精准等显著优势<sup>[3-4]</sup>。李冰等探索了热风微波流态化下香菇的水分变化,认为干燥过程中自由水、不易流动水、结合水 3 种水分间存在着相互转化<sup>[5]</sup>。张绪坤等在热风干燥胡萝卜上也做出了相关报道<sup>[6]</sup>。为了发现微波流态化干燥果蔬的降水规律,确立工艺优化的理论基础,本文在前人的基础上,研究姜片微波流态化干燥的动力学模型和水分迁移机理。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

新鲜的生姜,购于农贸市场;品质均匀,无机械损伤;含水率 90.5%。

### 1.2 实验仪器与设备

中国农业机械化科学研究院研制的 WB6E 型微波流态化干燥装备,由 6 只 1 kW 的磁控管独立馈入微波能,干燥过程在带有振动系统的物料盘上进行。生姜片在干燥过程中处于流态化状态,同时有排风系统即时排除湿热空气<sup>[7]</sup>。

PQ0001 型核磁共振分析仪及 MesoMR60 型成像分析系统,由上海纽迈电子科技有限公司生产;ACS 型电子天平,上海衡器厂生产。

### 1.3 实验与计算方法

#### 1.3.1 脱水率的计算

脱水率反映干燥过程中脱水速度的大小,数值上定义为相邻两次称量干基含水率的差值与时间间隔的比值。

#### 1.3.2 干燥模型拟合

农产品物料的干燥模型很多,表 1 中列举了常见的 5 种,均为非线性模型,为了计算方便进行了线性化处理<sup>[8-9]</sup>。表中, $t$  为干燥时间。

表 1 农产品干燥中常见的干燥模型

Tab. 1 Some mathematical models in agricultural produce drying

| 编号 | 模型名称              | 模型方程                    | 线性处理后的方程                          |
|----|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1  | Lewis/Newton      | $M_R = \exp(-kt)$       | $\ln M_R = -kt$                   |
| 2  | Page              | $M_R = \exp(-kt^n)$     | $\ln(-\ln M_R) = \ln k + n \ln t$ |
| 3  | Henderson - Pabis | $M_R = a \exp(-kt)$     | $\ln M_R = \ln a - kt$            |
| 4  | Lagarithmic       | $M_R = a \exp(-kt) + c$ | $\ln(M_R - c) = \ln a - kt$       |
| 5  | Wang - Singh      | $M_R = 1 + at + bt^2$   | $M_R = 1 + at + bt^2$             |

水分比  $M_R$  的计算公式为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中  $M_t$ ——干燥时间  $t$  所对应的含水率, %

$M_e$ ——平衡含水率, %

$M_0$ ——初始含水率, %

以上含水率皆为干基,由于  $M_e$  相对于初始含水率  $M_0$  来说比较小,常忽略不计<sup>[10-11]</sup>。实验中水分比的简化公式为

$$M_R = M_t / M_0 \quad (2)$$

将清洗后的新鲜生姜晾干,切成 3~5 mm 的薄片,分别在 0.8、1.2、1.6 W/g 单位质量微波功率下干燥,每 5 min 记录质量变化并得到相应的干基含水率。按照式(2)计算水分比。用待选模型拟合已得数据,得到最佳选择。拟合优度可用决定系数  $R^2$  和均方差来表示<sup>[1,12]</sup>。

#### 1.3.3 核磁共振实验

核磁共振(Nuclear magnetic resonance, NMR)是通过处在恒定磁场中的氢质子在射频脉冲下的横向弛豫时间  $T_2$  来反映水分子的结合力和水分迁移等相关信息的实验方法<sup>[6,13]</sup>。将清洗后的新鲜生姜晾干,切成 3~5 mm 的薄片,在 1.2 W/g 单位质量微波功率下干燥,每 8 min 抽取待检测样本,利用核磁共振分析仪 CPMG(Carr - Purcell - Meiboom - Gill)脉冲序列测定样品中品质均匀的中间部位的  $T_2$  值。

磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)或者称为核磁共振成像(NMRI),通常作为核磁共振波谱的扩展。它可以提供自旋的空间信息,得到质子在物料空间的分布。样品复杂结构的清晰度主要受组织成分中含水率的影响<sup>[14]</sup>。与 NMR 取样方式相同,MRI 数据用来反映在姜片微波干燥各个阶段水分空间分布的均匀性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 含水率及脱水率的变化

在单位质量微波功率为 0.8、1.2、1.6 W/g 条件下振动流态化干燥姜片,直至干基含水率不高于 8%,干燥时间分别为 105、65、50 min。在干燥后期,随着含水率变小干燥速率逐渐降低,如图 1 所示。

不同工艺参数的干燥效率不同,图 2 为脱水率随姜片干基含水率的变化关系。由图可知,微波干燥具有很高的脱水速度,并随着功率的增大而增大;脱水率在干燥过程中能很快升高,并维持在一个水平;在干燥后期,随着自由水的散失,脱水速度变小。

实验中对照分析了 85℃ 热风干燥的脱水速度,发现其远慢于微波干燥,并随着干基含水率的降低而逐渐减小。

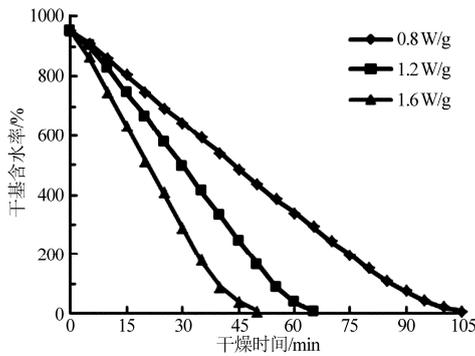


图 1 不同微波功率下的干燥曲线

Fig. 1 Drying curves at different microwave powers

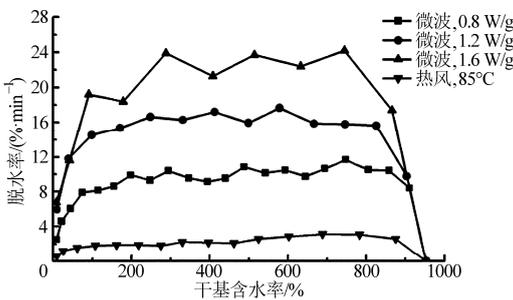


图 2 脱水率-干基含水率的关系曲线

Fig. 2 Dewatering rate - dry basis moisture content curves

## 2.2 最佳数学模型的确定

表 1 列举的干燥模型中,1、3、4 号模型  $\ln M_R$  和  $t$  皆为线性关系,因此首先应验证二者在姜片干燥过程中的相关性。根据水分比的变化,应用 Origin 8.0 软件拟合的结果如图 3 所示,发现各个干燥功率下  $\ln M_R$  和  $t$  都不存在线性关系,则这 3 种模型不适合微波干燥姜片。因此,本实验只需对 2 号 Page 模型和 5 号 Wang - Singh 模型进行拟合优度分析,相关变量的拟合结果分别如图 4、5 所示。

由模型方程的拟合图可知,Page 模型和 Wang - Singh 模型都可以描述姜片微波失水过程。为了确定最佳模型,对 Origin 8.0 得到的统计数据进行比较,如表 2 所示。可以发现 Wang - Singh 模型的决

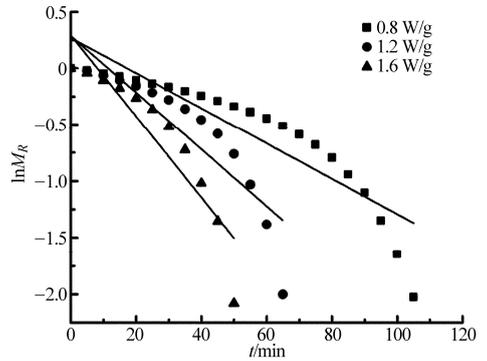


图 3 不同功率下  $\ln M_R - t$  的线性拟合曲线

Fig. 3  $\ln M_R - t$  linear fitting at different powers

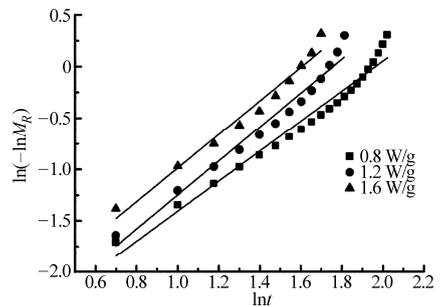


图 4 不同功率下  $\ln(-\ln M_R) - \ln t$  的线性拟合曲线

Fig. 4  $\ln(-\ln M_R) - \ln t$  linear fitting at different powers

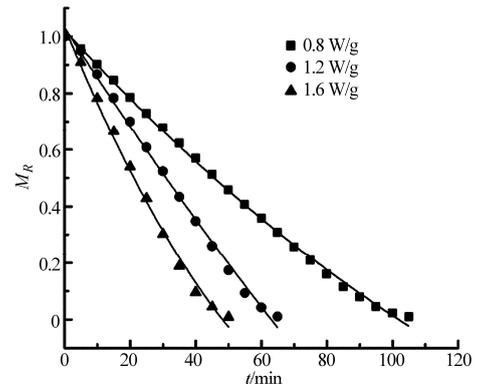


图 5 不同功率下  $M_R - t$  的二次拟合曲线

Fig. 5  $M_R - t$  quadratic fitting at different powers

定系数  $R^2$  最接近于 1,模型显著性分析的  $F$  值最大且为高度显著,均方差比 Page 模型小。由此判定 Wang - Singh 模型最适合微波流态化干燥姜片的降水过程。

表 2 不同干燥模型下的拟合结果

Tab.2 Fitting results of different drying models

| 模型方程                  | 单位质量微波功率/(W·g <sup>-1</sup> ) | 模型参数                                 | $R^2$ | 均方差  | $F$ 检验值 | 方程显著性                    |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------|------|---------|--------------------------|
| $M_R = \exp(-kt^n)$   | 0.8                           | $k = 0.00135, n = 1.46$              | 0.97  | 5.38 | 603.00  | $7.77 \times 10^{-16}$   |
|                       | 1.2                           | $k = 0.00126, n = 1.65$              | 0.97  | 3.61 | 376.83  | $7.36 \times 10^{-10}$   |
|                       | 1.6                           | $k = 0.00234, n = 1.63$              | 0.97  | 2.43 | 299.75  | $1.26 \times 10^{-7}$    |
| $M_R = 1 + at + bt^2$ | 0.8                           | $a = -0.01, b = 2.51 \times 10^{-5}$ | 1.00  | 1.10 | 6683.9  | $< 1.00 \times 10^{-16}$ |
|                       | 1.2                           | $a = -0.02, b = 2.54 \times 10^{-5}$ | 1.00  | 0.76 | 1686.9  | $2.07 \times 10^{-14}$   |
|                       | 1.6                           | $a = -0.03, b = 1.39 \times 10^{-4}$ | 0.99  | 0.62 | 854.67  | $4.71 \times 10^{-10}$   |

### 2.3 干燥过程水分信号的变化

根据核磁共振的弛豫图谱理论,通过采集横向弛豫时间  $T_2$  的衰减曲线,可以得到样品中  $T_2$  及对应的信号分量。信号量与氢质子的含量呈正比关系,信号量  $A_i$  对弛豫时间的积分面积  $A$  为样品在该弛豫时间段的信号量。

$T_2$  弛豫时间反映了氢质子所处的化学环境,与氢质子所受的束缚力和自由度有关。氢质子受束缚力越大或自由度越小,  $T_2$  弛豫时间越短,在  $T_2$  谱上峰位置较靠左;反之则  $T_2$  弛豫时间越长,在  $T_2$  谱上

峰位置较靠右。图6为姜片在1.2 W/g微波下干燥0、32、64 min时结合水、不易流动水(束缚水)与自由水在NMR弛豫时间  $T_2$  的分布图,分别对应3个弛豫时间段  $T_{21}$  (0.01 ~ 10 ms)、 $T_{22}$  (10 ~ 100 ms)、 $T_{23}$  (100 ~ 1 000 ms)。其中  $T_{21}$  表示与姜片中的极性基团紧密结合的水分子层,其对应的积分面积为  $A_{21}$ ;  $T_{22}$  表示存在于纤维束、细胞内的不易流动水层,其对应的峰积分面积为  $A_{22}$ ;  $T_{23}$  表示存在于细胞间隙中能自由流动的水,其对应的峰积分面积为  $A_{23}$ 。

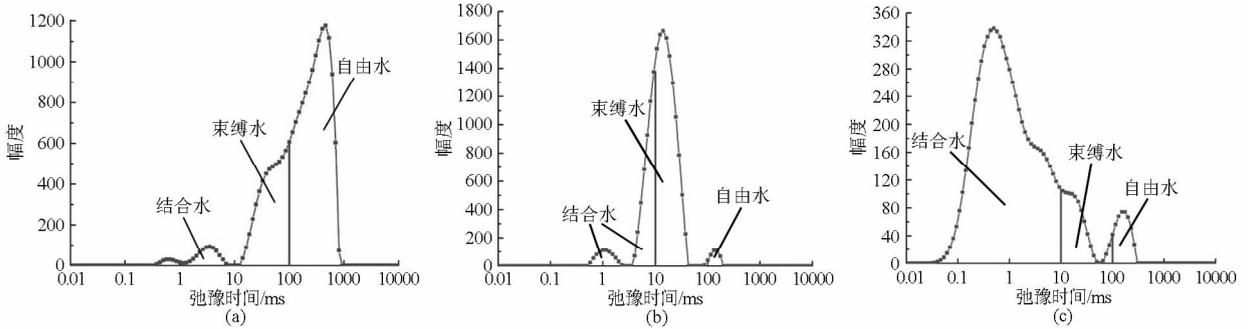


图6 微波干燥过程中水分  $T_2$  谱图

Fig. 6 Moisture  $T_2$ -spectrum in microwave drying process

(a) 新鲜姜片水分  $T_2$  谱图 (b) 干燥 32 min 姜片水分  $T_2$  谱图 (c) 干燥 64 min 姜片水分  $T_2$  谱图

由图6可知,新鲜姜片以自由水为主,束缚水次之,结合水的含量很少(图6a)。在微波干燥32 min后,样品自由水含量大幅降低,结合水和束缚水的含量都有所增加,整体水分以束缚水存在形式为主(图6b)。在微波干燥64 min后,物料水分已经干到安全保藏的水平,此时自由水和束缚水的信号很少,物料水分以结合水为主(图6c)。分析表明,自由水、束缚水在干燥过程中,均向与组织结合力强的方向转化,随着干燥的持续进行,最终剩下少量水分以结合水的形式与物料密切配合。为了更清楚反映各个阶段水分的流动性特点,实验得到了各相态水量( $A_{2i}$ )随干燥时间增加变化的趋势线,如图7所示。

发,大部分转变为不易流动的束缚水。束缚水含量( $A_{22}$ )在微波干燥16 min前大幅增多,在总水分中的比例也显著增加;在微波干燥16 ~ 56 min内,姜片中束缚水逐渐降低,但在总水分中的比例一直很高;在干燥56 min后,束缚水有快速减少的趋势。结合水含量( $A_{21}$ ),随着干燥时间增加浮动不大,在微波干燥56 ~ 64 min的最终阶段,姜片中结合水含量增加。物料的升温,自由水向束缚水的转变都需要能量,因此起始阶段干燥速度慢。随着干燥过程的持续,束缚水的降低会影响到物料的水分活度,结合水的上升使脱水难度继续加大,降水速度会逐渐变小,而物料水分最终转向可安全贮藏的水平。

对1.2 W/g微波下,不同干燥阶段姜片水分的MRI分析,可提供物料水分空间分布变化的信息。质子密度客观反映样品氢质子(主要是水分)的多少,含水率越高,亮度越高。对于不同干燥时间的姜片,水分在逐渐减少;同一时刻的样品,颜色有一定的差异。如图8所示。

分析认为,姜片在干燥过程中存在着不同程度的干燥不均,且在中间阶段(16 ~ 40 min)表现明显。如果物料的微波吸收能力随温度上升而上升,则微波加热使温度升高,而温度升高又使物料吸收的热量增大,两者相互影响会使加热集中在物料的特定区域内而使物料出现干燥不均,这种现象被称为“干层热失控”<sup>[15]</sup>。解决热失控问题,实现物料的均

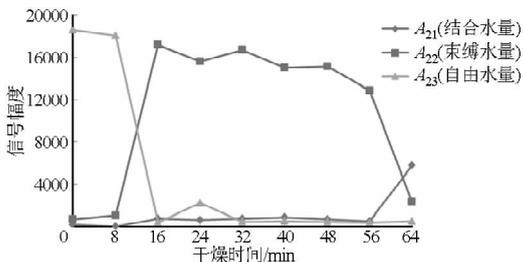


图7 各相态水量( $A_{2i}$ )随干燥时间增加变化趋势

Fig. 7 Changing trend of moisture content ( $A_{2i}$ ) for each phase in drying process

可以发现,姜片随着微波干燥时间的增加,自由水在16 min后含量( $A_{23}$ )骤减,在总水中的比例也显著降低;物料水分在这一时间内,自由水部分被蒸

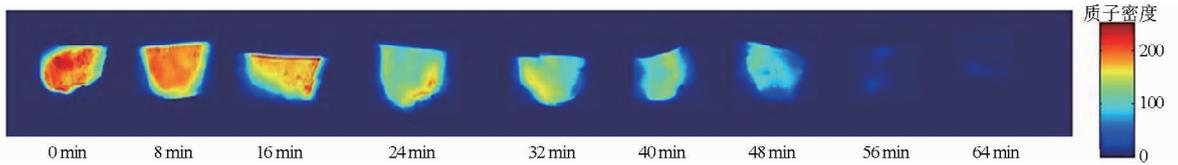


图8 微波干燥过程中水分分布

Fig. 8 Moisture distribution in microwave drying process

衡脱水仍是微波流态化干燥农产品要面对的工作。

### 3 结论

(1)相对传统的热风干燥来说,微波流态化干燥姜片具有较高的干燥效率。通过对5个常用干燥模型的拟合分析,发现Wang-Singh模型最适合描述姜片微波干燥的降水过程。在生产过程中,该模型可以直接预测姜片在不同干燥阶段的含水率。

(2)姜片在微波流态化作用下,大部分自由水

很快转变为不易流动的束缚水。在干燥过程中,水分一直向与有机组织结合紧密的方向发展,整个过程以干燥不易流动的束缚水为主,在最终阶段结合水含量有一定的升高。水分流动特点为工艺优化和品质控制提供理论参考。

(3)微波流态化干燥,流化床让物料分布更均匀,但水分干燥不均现象没有完全消除。要避免“干层热失控”现象,还应考虑间歇干燥等复合手段。

### 参 考 文 献

- Hasan Togrul. Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(3): 311-323.
- Wang Zhengfu, Sun Junhong, Chen Fang, et al. Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 536-544.
- 范崇东,范明辉,盛剑俊. NMR对水分的研究及其在食品科学中的应用[J]. 食品工业科技,2003(12):98-100.
- 陈卫江,林向阳,阮榕生,等. 核磁共振技术无损快速评价食品水分的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(4):125-130.
- 李冰,韩清华,尹青,等. 香菇热风微波流态化的干燥特性与机理分析 [C]//全国包装与食品工程、农产品加工学术年会论文集,2013.
- 张绪坤,祝树森,黄俭花,等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化 [J]. 农业工程学报,2012, 28(22): 282-287.  
Zhang Xukun, Zhu Shusen, Huang Jianhua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 282-287. (in Chinese)
- 韩清华,谢时军,李树君,等. 多热源热风微波流态化干燥实验台设计 [J]. 农业机械学报,2014,45(2):210-214.  
Han Qinghua, Xie Shijun, Li Shujun, et al. Design of multiple-sources microwave combining with hot-air fluidized drying test device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 210-214. (in Chinese)
- 陈金日,冉旭,刘学文,等. 微波干制干薯片规律的研究 [J]. 食品工业科技,2010(8):98-101.
- 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价 [J]. 农业机械学报,2010,41(6):128-132.  
Lin Xi'na, Wang Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6): 128-132. (in Chinese)
- 熊永森,王俊,王金双. 微波干制南瓜片干燥规律及工艺优化研究 [J]. 农业工程学报,2004,20(2):181-184.  
Xiong Yongsen, Wang Jun, Wang Jinshuang. Drying law and technology optimization of pumpkin slice dried by microwave [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 181-184. (in Chinese)
- 蒋玉萍,王俊. 番薯片微波干燥特性及干燥模型 [J]. 浙江农业学报,2009,21(4):407-410.  
Jiang Yuping, Wang Jun. Characteristics and model of microwave drying sweet potato [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2009, 21(4): 407-410. (in Chinese)
- 胥雪炎,李补喜. 不同被解释变量选择对决定系数 $R^2$ 的影响研究[J]. 太原科技大学学报, 2007, 28(5): 363-366.  
Xu Xueyan, Li Buxi. Research on the effect of selection of dependent variables on  $R^2$  statistic [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2007, 28(5): 363-366. (in Chinese)
- 陈卫江,林向阳,阮榕生,等. 核磁共振技术无损快速评价食品水分的研究 [J]. 食品研究与开发, 2006,27(4):125-127.  
Chen Weijiang, Lin Xiangyang, Ruan Rongsheng, et al. Study on quick and non-destructive estimate the moisture content of food using NMR [J]. Food Research and Development, 2006, 27(4): 125-127. (in Chinese)
- 阮榕生,林向阳,张锦胜,等. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用 [M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- 孙恒. 微波冷冻干燥中的热电偶和控制策略优化 [D]. 上海:上海交通大学,2005.