

# 玉米热风与微波联合干燥特性

徐艳阳,蔡森森,吴海成

(吉林大学 生物与农业工程学院,长春 130022)

**摘要:**为了探索玉米类大宗粮食品种的高效干燥方法,对玉米进行热风与微波联合干燥特性试验研究。前期采用 60 ℃热风干燥,当玉米水分含量为 20%,在后期采用 119 W 微波干燥,直至玉米水分为 12%~14%,研究玉米水分、温度随联合干燥时间的变化规律,建立相应的数学模型。与单独热风干燥相比,热风与微波联合干燥的总能耗降低了 50.6%。对不同干燥方式的玉米进行霉菌计数,结果表明,微波对玉米霉菌有明显的杀菌效果。

**关键词:**食品加工技术;玉米;微波辅助干燥;热风干燥;联合干燥;干燥模型

**中图分类号:**TS201   **文献标志码:**A   **文章编号:**1671-5497(2014)02-0579-06

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb201402047

## Combination drying characteristics of hot-air and microwave for maize

XU Yan-yang, CAI Sen-sen, WU Hai-cheng

(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to explore an effective combination drying method for grains, maize was dehydrated by a combination of hot-air and microwave drying. In the first drying stage, maize was dried by hot-air of 60 ℃. When maize moisture content was reduced to 20%, microwave drying was applied until corn moisture content fell to 12%~14%. Determinations of moisture and temperature of maize during the combination drying process were carried out and related mathematical models were established. Compared to hot-air drying, electrical energy consumption for combination drying was reduced by 50.6%. Furthermore, mould numbers from maize dried by different methods were counted; results show that microwave radiation has a significant germicidal efficacy.

**Key words:** food processing technique; maize; microwave-assisted drying; hot-air drying; combination drying; drying models

对玉米进行干燥加工是玉米安全贮藏的重要环节。多年来,国内外学者对玉米的干燥技术及设备进行了深入研究<sup>[1-4]</sup>,建立了相应的干燥理论及模型<sup>[5-6]</sup>。微波干燥以其独特的对物料内外同时加热的方式,具有干燥效率快、易控制和杀菌等优点,成为当前干燥技术发展的方向之一,将其与

热风干燥技术相结合的联合干燥技术是现代干燥技术的研究热点之一<sup>[7]</sup>。

目前关于热风与微波联合干燥果蔬类农产品、鱼肉<sup>[8-12]</sup>等的研究报道较多,而对玉米<sup>[13]</sup>等谷物的热风与微波联合干燥研究较少。本文对热风与微波联合干燥玉米的特性及能耗进行研究,为

收稿日期:2012-09-19.

基金项目:吉林大学基本科研业务费项目(200903263);吉林省科技发展计划项目(20120717).

作者简介:徐艳阳(1972-),女,副教授,博士。研究方向:食品干燥技术。E-mail:xuyy@jlu.edu.cn

探索“优质、高效、节能、环保”的粮食联合干燥技术及配套设备开发提供理论依据。

## 1 试验材料、仪器设备和方法

### 1.1 试验材料

试验用东北玉米采自吉林大学生物与农业工程学院玉米实验田,贮存于冰箱备用,其含水率为 31.39%。

### 1.2 仪器与设备

PH070A 干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;MM721AAU-PW 美的微波炉,美的微波电器制造有限公司;JA3003A 电子精密天平,上海精天电子仪器有限公司;T22N 紫外可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;PHS-25 数字酸度计,杭州东星仪器设备厂;BCD-L45 冰箱,合肥荣事达电冰箱有限公司;W4 万用电炉,北京科伟永兴仪器有限公司;CY-100 微量进样器,北京青云卓立精密设备有限公司;DHP060 恒温培养箱,上海实验仪器厂有限公司;洁净操作台,上海博讯实业有限公司医疗设备厂;VC305 红外测温仪,深圳市胜利高电子科技有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 单独热风干燥(HAD)

每次称取 100.0 g 玉米 3 份,铺成薄层,分别放入干燥箱中进行 55、60、65 ℃ 热风干燥。每隔 20 min 称玉米质量,直至含水率达到 12%~14% 时停止干燥。

#### 1.3.2 单独微波干燥(MD)

每次称取 100.0 g 玉米,铺成薄层,放入微波炉中以微波功率 119 W 进行干燥。每隔 10 min 称玉米质量,同时测量玉米表面的温度,直至含水率达到 12%~14% 时停止干燥。

#### 1.3.3 热风和微波联合干燥(HAMD)

前期进行热风干燥,即称取 100.0 g 玉米,将其铺成薄层,放入干燥箱中进行 60 ℃ 热风干燥,直至转换水分点为 20% 时,进入后期微波干燥,即将玉米放入微波炉中进行 119 W 微波干燥。每隔 5 min 称玉米质量,同时测量玉米表面的温度,直至含水率达到 12%~14% 时停止干燥。

#### 1.3.4 试验指标及方法

(1) 湿基含水率参照文献[14]的直接干燥法测定。

(2) 干基含水率的计算:

$$\omega_t = (m_t - m_{d.b.}) / m_{d.b.} \times 100\% \quad (1)$$

$$m_{d.b.} = m_0 - m_0 \times \omega_b \quad (2)$$

式中:  $\omega_t$  为  $t$  时刻玉米的干基含水率;  $m_t$  为  $t$  时刻玉米的质量;  $m_{d.b.}$  为玉米的干基质量;  $m_0$  为玉米的初始质量;  $\omega_b$  为玉米的初始湿基含水率。

(3) 转换水分点为

$$m_{tr} = \frac{m_0(1 - \omega_b)}{1 - \omega_{tr}} \quad (3)$$

式中:  $m_{tr}$  为玉米含水率为  $\omega_{tr}$  的质量;  $\omega_{tr}$  为转换水分点。

(4) 水分比的计算: 水分比(MR)以  $\omega_t / \omega_{d.b.}$  来简化计算<sup>[15-16]</sup>, 其中  $\omega_{d.b.}$  表示玉米的初始含水率(干基)。

(5) 干燥速率的计算:

$$u = \frac{\omega_{t+\Delta t} - \omega_t}{\Delta t} \quad (4)$$

式中:  $u$  为干燥速率;  $\omega_{t+\Delta t}$  为  $t + \Delta t$  时刻玉米的干基含水率。

(6) 总能耗的计算: 设备的功率 × 干燥时间

(7) 霉菌计数参照文献[17]测定。

#### 1.3.5 三种干燥模型<sup>[18]</sup>

(1) 单项扩散

$$MR = ae^{-kt} \quad (5)$$

式中: MR 为水分比;  $t$  为时间;  $a, k$  均为单项扩散模型的参数。

(2) Page 模型

$$MR = e^{-k't^n} \quad (6)$$

式中:  $k', n$  均为 Page 模型的参数。

(3) 经验模型

$$t = a \ln MR + b (\ln MR)^2 \quad (7)$$

式中:  $a, b$  均为经验模型的参数。

(4) 三种干燥模型的线性化方式见参考文献[13]。

## 1.4 数据分析

每次干燥试验重复 3 次, 取平均值, 采用 Excel 2003 和 SPSS V13.0 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米不同干燥方式的干燥曲线

#### 2.1.1 玉米单独热风干燥

玉米经单独热风干燥的结果见图 1 和图 2。由图 1 可知, 在 HAD 中, 水分比随干燥时间呈指数下降。由图 2 可知, 干燥初期 0~20 min 是玉米样品的预热阶段, 干燥速率从 0 至最高值 21.15%/h, 即调整阶段; 当干燥时间为 20~240

min时,干燥速率随干燥时间下降至 $2.19\%/\text{h}$ 。因此,HAD过程分为调整和降速两个阶段。

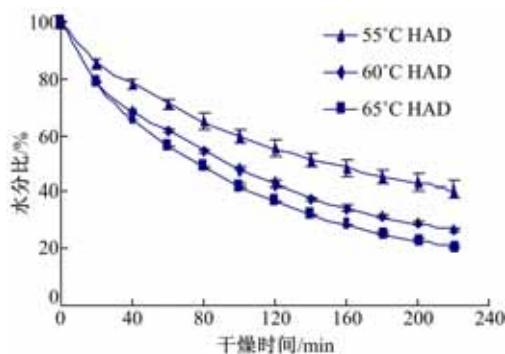


图1 玉米单独热风干燥的干燥曲线

Fig. 1 Drying curve of maize dehydrated by hot air drying

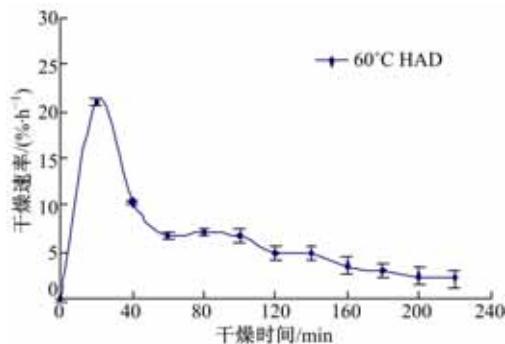


图2 玉米单独热风干燥的干燥速率曲线

Fig. 2 Drying rate curve of maize dehydrated by hot air drying

### 2.1.2 玉米单独微波干燥

玉米经单独微波干燥的结果见图3、图4和图5。由图3可知,随着微波干燥时间的延长,水分比逐渐减少,且比HAD时下降得快。由图4和图5可知,干燥初期0~20 min,温度随干燥时间迅速上升至69.8 °C,干燥速率则从0升至最高值41.04%/h,并且最高值明显高于HAD,该阶

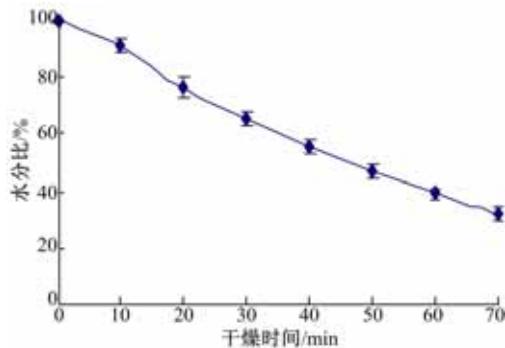


图3 玉米单独微波干燥的干燥曲线

Fig. 3 Drying curve of maize dehydrated by microwave drying

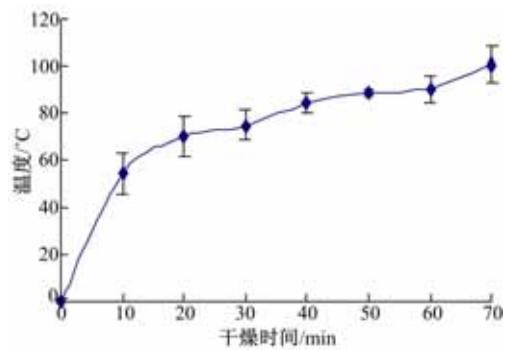


图4 玉米单独微波干燥的温度曲线

Fig. 4 Temperature curve of maize dehydrated by microwave drying

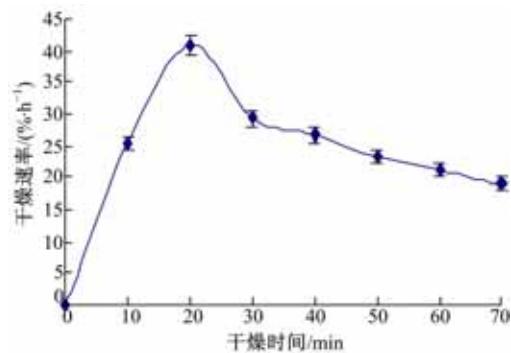


图5 玉米单独微波干燥的干燥速率曲线

Fig. 5 Drying rate curve of maize dehydrated by microwave drying

段属于调整阶段;当干燥时间为20~70 min时,温度随时间的延长而逐渐增加,最终达100.8 °C,干燥速率则下降至19.02%/h。MD过程可分为调整和降速两个阶段。

### 2.1.3 玉米热风与微波联合干燥

玉米经前期60 °C热风、后期119 W微波干燥的结果见图6、图7和图8。由图6可知,0~106 min为前期热风干燥,水分比随干燥时间的

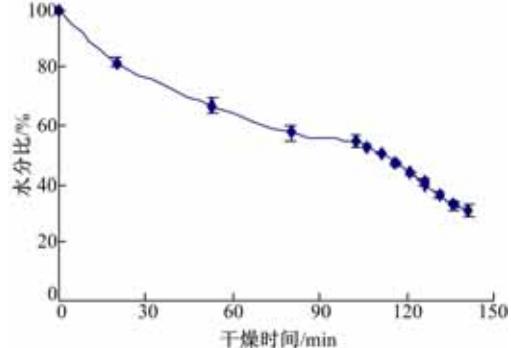


图6 玉米联合干燥的干燥曲线

Fig. 6 Drying curve of maize dehydrated by a combination drying

延长从 100% 下降至 53.04%; 106~141 min 为后期微波干燥, 水分比随干燥时间的延长迅速下降至 31.01%, 这时玉米含水率达 14%, 且干燥时间少于单独热风干燥。由图 7 可知, 当干燥时间为 0~106 min 时, 温度逐渐升至 60 °C 并保持恒定; 当干燥时间为 106~141 min 时, 温度随时间迅速上升至 96 °C, 但该终点温度低于 MD 终点温度, 有利于避免玉米表面层受热过度。

由图 8 可知, 前期热风干燥速率明显低于后

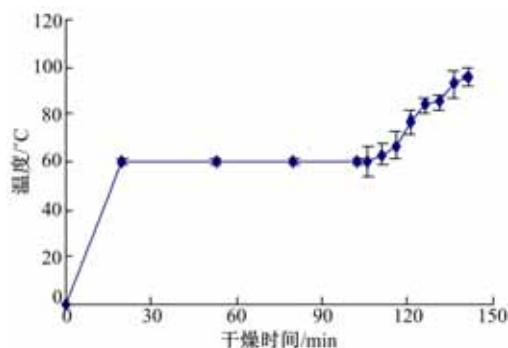


图 7 玉米联合干燥的温度曲线

Fig. 7 Temperature curve of maize dehydrated by a combination drying

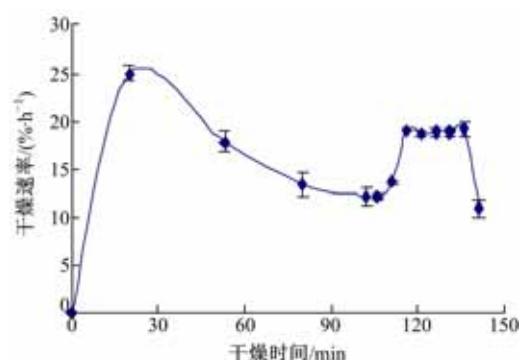


图 8 玉米联合干燥的干燥速率曲线

Fig. 8 Drying rate curve of maize dehydrated by a combination drying

期微波干燥。在前期 60 °C 热风干燥中 (0~106 min), 干燥速率最高值达 24.96%/h, 干燥过程分为调整和降速阶段; 后期微波干燥过程可分为调整 (106~116 min)、恒速 (116~136 min) 和降速 (136~141 min) 三个阶段, 干燥速率在恒速阶段达最高值 19.14%/h, 大大加快了脱水速率。

## 2.2 玉米干燥模型的建立

根据玉米干燥曲线 (图 1、图 3 和图 6), 采用 Excel 2003 和 SPSS V13.0 软件进行分析, 结果见表 1。

表 1 玉米干燥模型的比较

Table 1 Comparison of drying models for maize

模型名称	方程	线性形式	相关系数 R <sup>2</sup>		
			单独热风 (HAD) (55 °C)	单独微波 (MD)	联合干燥后期 (HAMD)
单项扩散模型	$MR = ae^{-kt}$	$\ln MR = \ln a - kt$	(60 °C) 0.9915 (65 °C) 0.9936 (55 °C) 0.9986	(60 °C) 0.9988 (65 °C) 0.9947 (55 °C) 0.9998	0.9988 0.9409 0.9493
Page 模型	$MR = e^{-k't^n}$	$\ln(-\ln MR) = \ln k' + n \ln t$	(60 °C) 0.9980 (65 °C) 0.9744 (55 °C) 0.9986	(60 °C) 0.9947 (65 °C) 0.9998 (55 °C) 0.9940	0.9940 0.9409 0.9493
经验模型	$t = a \ln MR + b(\ln MR)^2$	$\frac{t}{\ln MR} = a + b \ln MR$	(60 °C) 0.9409 (65 °C) 0.9785	(60 °C) 0.6151 (65 °C) 0.9493	0.9493

由表 1 可知, 对于 HAD,  $\ln(-\ln MR)$  与  $\ln t$  的平均  $R^2$  值最大, 拟合较好。在关系式  $\ln(-\ln MR) = \ln k' + n \ln t$  中,  $k'$  与干燥参数的关系式为

$$k' = a_0 e^{-b_0/T}$$

$n$  与干燥参数的关系式为

$$n = c_0 + d_0 T + e_0 T^2$$

式中:  $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$ 、 $d_0$ 、 $e_0$  为常数,  $T$  为干燥介质绝对温度。由此得到:

$$\ln(-\ln MR) = \ln a_0 - b_0/T + c_0 \ln t + d_0 T \ln t + e_0 T^2 \ln t$$

对其进行多元线性回归分析, 确定其系数分别为:  $\ln a_0 = 17.318$ , 即  $a_0 = 33197993.656$ ,  $b_0 = 7042.127$ ,  $c_0 = 1.090$ ,  $d_0 = -3.044 \times 10^{-6}$ , 该方程的  $R^2 = 0.9941$ 。

HAD 的模型为

$$MR =$$

$$\exp[-33197993.656 \times e^{-7042.127/T} \times t^{(1.090-3.044 \times 10^{-6} \times T^2)}] \quad (8)$$

对于MD,  $\ln MR$  与  $t$  的  $R^2$  值最大, 拟合较好。在关系式  $\ln MR = \ln a - kt$  中,  $k$  与干燥参数的关系式为:  $k = b + cT + dT^2$ , 其中,  $b, c$  为常数,  $T$  为干燥介质绝对温度。由此可以得到:

$$\ln MR = \ln a - bt - ctT - dtT^2$$

对其进行多元线性回归分析, 确定其系数分别为:  $\ln a = 0.042$ ,  $-b = -0.008$ ,  $-d = -6.0 \times 10^{-8}$ , 即  $a = 1.043$ ,  $b = 0.008$ ,  $d = 6.0 \times 10^{-8}$ , 该方程的  $R^2 = 0.9995$ 。因此, MD 的模型为

$$MR = 1.043 \exp[-(0.008 + 6.0 \times 10^{-8} T^2) t] \quad (9)$$

对于HAMD, 前期热风干燥模型与式(8)相同。在后期微波干燥中,  $\ln MR$  与  $t$  的  $R^2$  值最大, 得到联合干燥后期干燥模型中的系数分别为:  $\ln a = -0.613$ ,  $-b = -0.001$ ,  $-d = -1.1 \times 10^{-7}$ , 即  $a = 0.542$ ,  $b = 0.001$ ,  $d = 1.1 \times 10^{-7}$ , 该方程的  $R^2 = 0.9978$ 。因此, HAMD 的模型为

$$MR = \begin{cases} \exp[-33197993.656 \times e^{-7042.127/T} \times t^{(1.090-3.044 \times 10^{-6} \times T^2)}], & \text{前期} \\ 0.542 \exp[-(0.001 + 1.1 \times 10^{-7} T^2) t], & \text{后期} \end{cases} \quad (10)$$

### 2.3 能耗比较

记录玉米3种不同干燥方式的干燥时间, 重复3次取平均值, 不同方法的能耗对比结果见表2。

表2 不同干燥方式的能耗比较

Table 2 Energy consumption comparison of different drying methods

干燥方式	干燥时间 /min	单位能耗 $(10^5 \text{ J} \cdot \text{h}^{-1})$	总能耗/ $10^7 \text{ J}$
HAD	220	55.8	122.8
MD	70	4.284	2.999
HAMD	106(前期) 35(后期)	55.80(前期) 4.284(后期)	60.65

由表2可知, 总能耗由小到大依次为: MD, HAMD, HAD。一方面, 与HAD相比, HAMD总能耗降低了50.6%; 另一方面, 由于部分热风干燥的使用, 因此HAMD的总能耗高于MD。

### 2.4 经不同干燥方式的玉米霉菌计数对比分析

对3种不同干燥方式的玉米样品, 检测其霉菌数如下: 未干燥(新鲜)为  $1.44 \times 10^6 \text{ CFU/g}$ , 单独热风(HAD)为  $1.88 \times 10^4 \text{ CFU/g}$ , 单独微波(MD)小于  $1 \text{ CFU/g}$ , 热风与微波联合干燥

(HAMD) 小于  $1 \text{ CFU/g}$ 。由此可知: HAMD后期经过微波处理, 所有稀释平板上均无霉菌生长, 其霉菌计数为  $< 1 \text{ CFU/g}$ , 表明HAMD对霉菌的灭活作用明显优于HAD, 也表明微波辐射具有显著的杀菌效果。

## 3 结论

(1) 对玉米进行热风与微波联合干燥实验, 由其干燥速率曲线可知, 联合干燥过程分为调整、降速、调整、恒速、降速5个阶段, 后期采用微波干燥的速率较高, 显著提高了玉米的脱水效率。

(2) 建立了玉米热风与微波联合干燥模型, 其中, Page模型  $MR = \exp(-k't^n)$  适合用来描述玉米联合干燥的前期阶段, 相关系数  $R^2$  平均值为 0.9941; 单项扩散模型  $MR = ae^{-kt}$  适合用来描述联合干燥的后期阶段, 相关系数  $R^2$  为 0.9978。

(3) 热风与微波联合干燥的总能耗比单独热风干燥的能耗降低了50.6%。

(4) 玉米经微波干燥后霉菌数显著降低, 微波杀菌的效果明显优于热风干燥。

## 参考文献:

- [1] 张玉荣,周显青,刘通.高水分玉米热风和真空干燥过程中品质特性的动态变化规律[J].粮食与饲料工业,2009(8):11-14.  
Zhang Yu-rong, Zhou Xian-qing, Liu Tong. Dynamic changes of quality characteristics of high-moisture maize in hot-air and vacuum drying process[J]. Cereal & Feed Industry, 2009(8):11-14.
- [2] 张玉荣,成军虎,周显青,等.高水分玉米微波干燥特性及对加工品质的影响[J].河南工业大学学报:自然科学版,2009,30(6):1-5.  
Zhang Yu-rong, Cheng Jun-hu, Zhou Xian-qing, et al. Microwave drying characteristics of high-moisture maize and the effect on processing quality[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2009, 30(6): 1-5.
- [3] 张志军,徐成海,张世伟.玉米真空干燥特性的实验研究[J].真空,2007,44(4):55-58.  
Zhang Zhi-jun, Xu Cheng-hai, Zhang Shi-wei. Experimental investigation on vacuum drying characteristics of maize[J]. Vacuum, 2007, 44(4): 55-58.
- [4] Liu Xue-qiang, Chen Xiao-guang, Wu Wen-fu, et al. Process control based on principal component analysis for maize drying[J]. Food Control, 2006, 17(11):894-899.

- [5] 曹崇文. 农产品干燥机理、工艺与技术[M]. 北京:中国农业大学出版社, 1998.
- [6] Parti M. Selection of mathematical model for drying grain in thin-layers[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 54(4): 339-352.
- [7] 张慤, 徐艳阳, 孙金才. 国内外果蔬联合干燥技术的研究进展[J]. 无锡轻工大学学报, 2003, 22(6): 103-106.  
Zhang Min, Xu Yan-yang, Sun Jin-cai. Research developments of combination drying technology for fruits and vegetables at home and abroad[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 2003, 22(6): 103-106.
- [8] Torringa E, Esveld E, Scheewe I, et al. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(2/3): 185-191.
- [9] Sharma G P, Prasad S. Drying of garlic(*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 50(2): 99-105.
- [10] Baysal T, Ersus S, Içier F. Effects of microwave and hot air combination drying on the quality of carrots [J]. Food Science and Biotechnology, 2002, 11(1): 19-23.
- [11] 刘春泉, 江宁, 李大婧, 等. 微波联合热风干制苏渝303甘薯干工艺研究[J]. 核农学报, 2009, 23(6): 1008-1013.  
Liu Chun-quan, Jiang Ning, Li Da-jing, et al. Combinaton of microwave and hot air treatment for dry chip production of SUYU-303 sweet potato [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(6): 1008-1013.
- [12] Duan Zhen-hua, Jiang Li-na, Wang Ju-lan, et al. Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating[J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(4): 472-476.
- [13] 贾洪雷, 蔡森森, 徐艳阳, 等. 玉米热风与微波联合干燥工艺优化研究[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(7): 61-64.  
Jia Hong-lei, Cai Sen-sen, Xu Yan-yang, et al. Studies on process optimization of maize dehydrated by a combination of hot-air and microwave drying [J]. Food Research and Development, 2011, 32(7): 61-64.
- [14] 张水华. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2006; 52-53.
- [15] Drouzas A E, Tsami E, Saravacos G D. Microwave/vacuum drying of model fruit gels[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 39(2): 117-122.
- [16] To grul ÍT, Pehlivan D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 209-216.
- [17] GB 4789. 15—2010. 食品安全国家标准食品微生物学检验霉菌和酵母计数[S].
- [18] 袁月明, 陈丽梅, 王鸿斌, 等. 玉米丸粒化种子的薄层干燥试验及其干燥模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 169-173.  
Yuan Yue-ming, Chen Li-mei, Wang Hong-bin, et al. Experiment on thin layer drying of pelleted corn seed and its drying model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(3): 169-173.