

广式腊肉热泵薄层干燥数学模型研究

张雪娇^{1,2}, 肖更生¹, 唐道邦^{1,*}, 余元善¹, 徐玉娟¹, 吴继军¹

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东省农产品加工重点实验室, 广东 广州 510610;

2. 湖南人文科技学院生命科学系, 湖南 娄底 417000)

摘 要: 为提高广式腊肉干燥过程中能源利用效率和物料水分控制准确度, 通过测定广式腊肉不同温度、风速条件下的热泵干燥水分比(MR), 选用11种常用的薄层干燥数学模型进行拟合比较, 根据模型的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和卡方(χ^2)值确定了最佳模型; 采用回归分析拟合了干燥模型常数、系数与干燥温度、风速之间的关系。结果表明: Two term模型比其他模型能更好地反映广式腊肉的热泵干燥规律, 含水率的预测值与实际值吻合较好, 在干燥温度50~60℃和风速0.4~1.0m/s的范围内, 可以用来描述广式腊肉的热泵干燥进程。

关键词: 广式腊肉; 热泵干燥; 数学模型; 薄层干燥

Mathematical Modeling of Thin Layer Heat Pump Drying of Cantonese-Style Meat

ZHANG Xue-jiao^{1,2}, XIAO Geng-sheng¹, TANG Dao-bang^{1,*}, YU Yuan-shan¹, XU Yu-juan¹, WU Ji-jun¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Agri-food Processing, Sericulture and Agri-food Research Institute,

Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China;

2. Department of Life Science, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China)

Abstract: To improve the energy utilizing efficiency and the monitoring accuracy of material moisture in the drying process of Cantonese cured meat, a heat pump dryer was used for drying Cantonese cured meat, and the kinetics of moisture ratio (MR) were fitted to select 11 different mathematical models of thin-layer drying. An optimum model was chosen based on their coefficients of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and chi-square (χ^2). The effects of drying air temperature and velocity on the model constants and coefficients were evaluated by regression analysis. The results showed that the Two term model was superior to the others in describing the drying curves of Cantonese cured meat and experimental data of MR was in agreement with the predicted results. The effect of drying air temperature and velocity within the range of 50—60 °C and 0.4—1.0 m/s could be described to predict the moisture content of the product with the model using the established model.

Key words: cantonese cured meat; heat pump drying; mathematical modeling; thin layer drying

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)05-0100-05

广式腊肉是我国著名的传统肉制品, 干燥工艺是影响腊肉品质好坏的关键环节。传统的干燥方式多采用热风烘干, 生产周期长, 生产效率低, 能耗高, 在干燥过程中控温排湿依赖操作人员经验。实现广式腊肉干燥的工程化和科学化对提升整个产业效益有重要作用。

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。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水产、肉禽、果蔬干燥加工方面^[1-3]。

广式腊肉干燥过程数学模型是广式腊肉干燥作业自动控制以及干燥工艺优化的重要依据。薄层干燥是物料的每一部分都充分暴露在相同条件下的干燥, 物料厚度一般小于2cm^[4]。物料内部结构的各向异性和非均一性, 产品形状的不规则, 以及干燥过程中的体积收缩^[5-6], 使得水分扩散机理变得更加复杂。因此, 分析、模拟肉中的水分扩散现象时需建立一系列的假设。假设条件虽然因模型需要而有所不同, 但是均以费克第二定律——非稳态扩散作为基础^[5]。目前, 用来描述干燥过程的数学模型已有上百种, 其中薄层干燥模型是一种应用十分广泛的模型。近年来, 国内外学者已经在谷物、水果、蔬菜、水产品和其他一些农作物的干燥中使用薄层干燥模

收稿日期: 2011-11-23

基金项目: 广东省科技计划项目(2008B080203006; 2009B080509018); 中山市科技计划项目(20092A124; 20114A259)

作者简介: 张雪娇(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学。E-mail: snowjz2008@yeah.net

*通信作者: 唐道邦(1973—), 男, 副研究员, 硕士, 研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: tdbang@163.com

型进行了数学模拟^[8-12]。而对于肉制品的干燥模型研究较少^[5],尤其是肉制品热泵干燥的数学模型还未见报道。本实验研究热泵干燥过程中干燥温度和风速对含水率和干燥速率的影响,通过建立广式腊肉热泵薄层干燥的数学模型,为广式腊肉干燥加工过程水分控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

实验原料采用不带奶脯的肋条肉,厚度约0.8cm,切成宽1.5cm、长33~38cm的条状,皮上无毛,无伤斑。

1.2 仪器与设备

BS124S型分析天平 赛多利斯科学仪器有限公司; DHG-9240A型电热恒温鼓风干燥箱 上海精宏试验设备有限公司; 称量瓶 上海精科仪器有限公司; GHRH-20型试验热泵干燥系统(如图1所示,设备主要包括库体、主机、室外机、循环风机、排湿风机、车架和电控系统。采用R134a冷媒、PLC+触摸屏控制和电辅助加热升温方式,干燥库体最高温可达65℃。物料悬挂或装盘放置车架上,推入干燥库体内,由主机、室外机、循环风机和排湿风机组成的热泵干燥系统完成对物料的干燥脱水,冷凝水由排水管排出库体外) 广东省农业机械研究所。

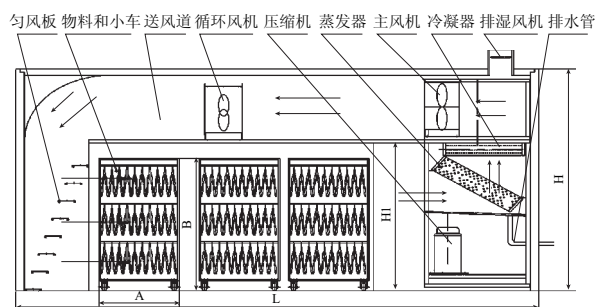


图1 GHRH-20热泵干燥系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the GHRH-20 heat pump dryer

1.3 方法

1.3.1 工艺流程

五花肉→腌制(4℃条件下腌制24h)→晾挂(1h)→干燥→冷却→包装→成品

1.3.2 干燥工艺条件

表1 热泵干燥工艺条件

Table 1 Technical conditions of HPD

实验号	1	2	3	4	5	6
温度/℃	50	50	55	55	60	60
风速/(m/s)	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0

为探讨干燥温度和风速对广式腊肉的影响,并建立数学模型,参考工厂热风干燥广式腊肉生产配方和工艺,设

计了6个干燥工艺条件(表1)。放进物料前,先将干燥机预热30min,干燥温度稳定后,悬挂放入(10.0±0.2)kg物料;整个干燥过程时间为48h,放进干燥机前测一次含水率,0~12h内每隔2h测定一次,12~39h内每隔3h测定一次,烘烤结束前9h测定2次。国标中规定腊肉含水量≤25%,实际生产中腊肉的含水量很低(8%~16%),国外有关资料认为,干肉含水量在15%时,其水分活性在0.70以下,能有效地抑制细菌、霉菌的繁殖^[13]。

1.4 指标测定

1.4.1 含水率

含水率的测定参照GB/T 5009.3—2003《食品中水分的测定》,肉与肉制品水分含量测定方法中的直接干燥法。精密称取匀浆5.0~10.0g(精确至0.0001g),干燥至恒质量,以干基湿含量(M_d)表示水分含量,计算公式如式(1)所示。

$$M_d = \frac{m_w}{m_d} \quad (1)$$

式中: m_w 为物料中水分质量/g; m_d 为物料中干物质量/g。

1.4.2 水分比

水分比用于表示一定干燥条件下物料还有多少水分未被干燥除去,可以用来反映物料干燥速率的快慢,计算公式如式(2)所示。

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

式中: M 为某时刻物料含水率/%; M_e 为物料平衡含水率/%; M_0 为物料初始含水率/%。

1.4.3 干燥速率

干燥速率定义为单位时间内每单位面积(物料和干燥介质的接触面积)湿物料汽化的水分质量。当物料与干燥介质的接触面积不易确定时,用干燥强度表示干燥速率,其定义为物料湿含量随时间的变化率,通常用 N_d 表示,计算公式如式(3)所示。

$$N_d = \frac{dM_d}{dt} = \frac{M_{d,i+1} - M_{d,i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

式中: N_d 为干燥速率/(g/(g·h)); $M_{d,i+1}$ 为 t_{i+1} 时刻干基湿含量/g; $M_{d,i}$ 为 t_i 时刻干基湿含量/g。

1.4.4 干燥数学模型

物料干燥过程是一个复杂的热量质量传递过程,同时又与物料的物理特性密切相关。众多学者通过不同物料的干燥实验研究,总结了多个理论、半理论和经验模型用于描述干燥过程中物料含水率与时间的变化规律。为了定量地描述广式腊肉热泵干燥的过程,实验选用了11种常见的用于农产品物料薄层干燥的数学模型(表2)进行拟合比较。

表2 选用的干燥曲线数学模型

Table 2 Selected mathematical models to describe the drying curves

序号	模型名称	模型方程式
1	Newton ^[14]	$MR = \exp(-kt)$
2	Page ^[15]	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page ^[16]	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis ^[17]	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic ^[18]	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Two term ^[19]	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
7	Two-term exponential ^[20]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
8	Diffusion approach ^[21]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
9	Modified Henderson and Pabis ^[11]	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
10	Vermal ^[22]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
11	Midilli-kucuk ^[12]	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

注: k 、 k_0 、 k_1 、 g 、 h 为干燥常数; a 、 b 、 c 、 n 为干燥系数; t 为干燥时间/h。

模型的决定系数(R^2)用来描述干燥曲线的最佳干燥模型的首要误差参数, 均方根误差(RMSE)和卡方(χ^2)用来测定拟合优度。当 R^2 越大, RMSE和 χ^2 越小, 干燥方程被认为最佳^[18,23-24]。RMSE、 χ^2 分别定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N}} \quad (4)$$

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

式中: $MR_{pre,i}$ 为 i 时刻含水率的预测值/%; $MR_{exp,i}$ 为 i 时刻含水率的实验值/%; N 为观测次数; n 为回归模型中常数项的个数。

2 结果与分析

2.1 干燥温度对广式腊肉干燥速率的影响

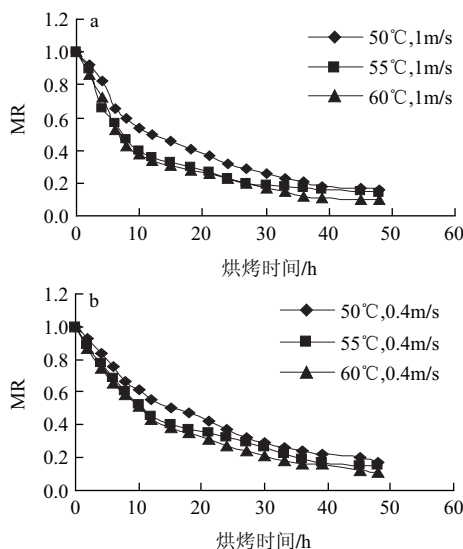


图2 不同干燥温度条件下广式腊肉热泵干燥曲线

Fig.2 Effect of temperature on the drying rate of Cantonese cured meat dried with HPD

由图2a可知, 随着干燥时间延长, 物料残余水分逐渐减少, 干燥速率由大减小, 最后趋于平衡。在1m/s风速下, 将物料干燥到 $MR=0.35$ (含水率为25%), 干燥温度为50、55、60℃分别需要21.5、12.5、10.5h, 干燥温度为60℃与50℃相比, 干燥时间约缩短了51%, 与55℃相比, 干燥时间约缩短了16%; 将物料干燥到 $MR=0.19$ (含水率为15%), 干燥温度为50、55、60℃分别需要38、29、27.5h, 干燥温度为60℃与50℃相比, 干燥时间约缩短了28%, 与55℃相比, 干燥时间约缩短了5%; 由图2b可知, 0.4m/s风速条件下, 将物料干燥到 $MR=0.35$ (含水率为25%), 干燥温度为50、55、60℃分别需要25、21、18h, 干燥温度为60℃与50℃相比, 干燥时间约缩短了28%, 与55℃相比, 干燥时间约缩短了14%; 在 MR 值达到0.19(含水率为15%)时, 干燥温度为50、55、60℃分别需要46、36、32h, 干燥温度为60℃与50℃相比, 干燥时间约缩短了30%, 与55℃相比, 干燥时间约缩短了11%。温度升高可以加快水分蒸发, 从而提高物料的干燥速率。从实验结果看, 干燥温度分别为50、55、60℃时, 物料的干燥速率依次增大, 但增大的幅度不同。55℃和60℃时的物料干燥速率相近, 明显高于50℃条件下的物料。

2.2 风速对广式腊肉干燥速率的影响

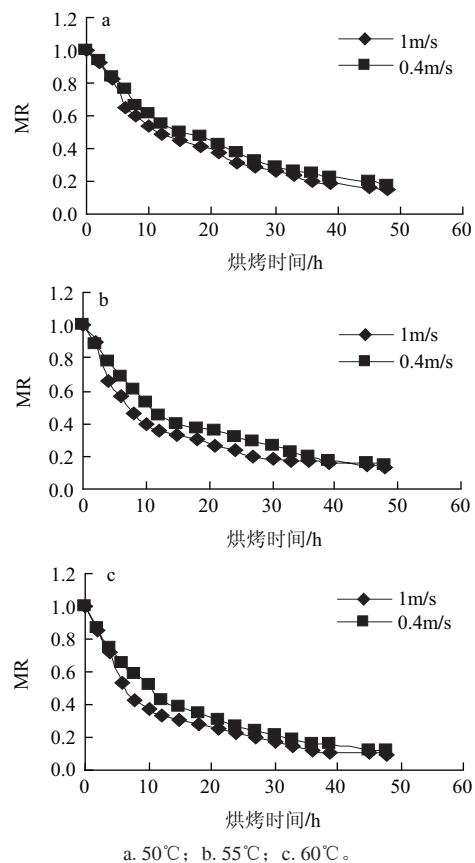


图3 不同干燥风速下广式腊肉热泵干燥曲线

Fig.3 Effect of velocity on the drying rate of Cantonese cured meat dried with HPD

由图3可知, 风速分别为1、0.4m/s时, 将物料干燥到MR=0.35(含水率为25%), 当温度为50℃, 所需时间分别为20、25h, 干燥时间约缩短了25%; 当温度为55℃, 所需时间分别为13、18h, 干燥时间约缩短了46%; 当温度为60℃, 所需时间分别为11、18h, 干燥时间约缩短了64%。风速分别为1、0.4m/s时, 将物料干燥到MR=0.19(含水率为15%), 当温度为50℃, 所需时间分别为38、46h, 干燥时间约缩短了21%; 当温度为55℃, 所需时间分别为29、36h, 干燥时间约缩短了24%; 当温度为60℃, 所需时间分别为27、32h, 干燥时间约缩短了19%。在50、55、60℃干燥温度条件下, 风速的变化对广式腊肉含水率的变化速度具有明显影响。随着风速的增大, 广式腊肉含水率变化曲线变陡, 干燥时间变短。

2.3 广式腊肉热泵干燥数学模型建立

表3 不同干燥条件下广式腊肉各干燥模型的数据结果
Table 3 Statistical results of different mathematical models under varying drying conditions

模型名称	干燥 风速/(m/s)	50℃			55℃			60℃		
		R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2	R^2	RMSE	χ^2
Newton	1.0	0.96800	0.04563	0.00220	0.91150	0.07433	0.00437	0.93630	0.06578	0.00458
	0.4	0.98700	0.02880	0.00088	0.96300	0.04853	0.00249	0.97640	0.03998	0.00169
Page	1.0	0.98930	0.02636	0.00078	0.97650	0.03828	0.00165	0.97690	0.05146	0.00298
	0.4	0.99520	0.01742	0.00034	0.99160	0.02315	0.00060	0.99670	0.01491	0.00025
Modified Page	1.0	0.98930	0.02636	0.00078	0.97650	0.03828	0.00165	0.97690	0.03964	0.00177
	0.4	0.99520	0.01742	0.00034	0.99160	0.02315	0.00060	0.99670	0.01491	0.00025
Henderson and Pabis	1.0	0.97450	0.04070	0.00186	0.92900	0.06654	0.00498	0.94550	0.06084	0.00416
	0.4	0.98930	0.02606	0.00076	0.97340	0.04113	0.00190	0.98390	0.02379	0.00064
Logarithmic	1.0	0.99060	0.02469	0.00073	0.99040	0.02446	0.00072	0.98400	0.03303	0.00131
	0.4	0.99680	0.01433	0.00025	0.99240	0.02196	0.00058	0.99710	0.01406	0.00024
Two term	1.0	0.99380	0.02008	0.00052	0.99370	0.01985	0.00051	0.98980	0.02632	0.00089
	0.4	0.99730	0.01311	0.00022	0.99580	0.01639	0.00035	0.99880	0.00896	0.00010
Two-term exponential	1.0	0.99040	0.02500	0.00070	0.95850	0.05091	0.00292	0.97030	0.04490	0.00227
	0.4	0.99680	0.01438	0.00023	0.99030	0.02477	0.00069	0.99640	0.01561	0.00027
Diffusion approach	1.0	0.99300	0.02133	0.00055	0.99280	0.02118	0.00054	0.98870	0.02773	0.00092
	0.4	0.99700	0.01380	0.00023	0.99550	0.01689	0.00034	0.99880	0.00903	0.00010
Modified Henderson and Pabis	1.0	0.99380	0.06758	0.00685	0.99370	0.01985	0.00059	0.98980	0.02632	0.00104
	0.4	0.99730	0.01306	0.00026	0.99580	0.01638	0.00040	0.99880	0.00896	0.00012
Vermal	1.0	0.99300	0.02133	0.00055	0.99280	0.02118	0.00054	0.98870	0.02773	0.00092
	0.4	0.99700	0.01380	0.00023	0.99550	0.01689	0.00034	0.99880	0.00903	0.00010
Midilli-kucuk	1.0	0.99160	0.02337	0.00070	0.98880	0.02648	0.00090	0.98300	0.03399	0.00149
	0.4	0.99690	0.01416	0.00026	0.99350	0.02027	0.00053	0.99810	0.01144	0.00017

将不同温度和风速条件下广式腊肉热泵干燥的MR数据代入表2中的11种数学模型进行拟合。相应的参数值、 R^2 、RMSE和 χ^2 见表3。通过比较各干燥条件下不同模型的 R^2 值、RMSE和 χ^2 值, 发现所有实验模型的 R^2 值在0.9115~0.9988之间, RMSE值在0.0090~0.0743之间, χ^2 值在0.004581~0.000098之间。而Two term模型的 R^2 值在0.9898~0.9988之间, RMSE值在0.0090~0.0263之间, χ^2 值在0.000891~0.000103之间, Two term模型 R^2 值最高且RMSE、 χ^2 值最低。因此将Two term模型作为反映广式腊肉热泵干燥规律的最佳模型。广式腊肉不同干燥条件

下Two term模型的干燥常数 k_0 、 k_1 及系数 a 、 b 和数据参数如表4所示。

表4 广式腊肉不同干燥条件下Two term模型的干燥数据
Table 4 Statistical results of Two term model for Cantonese cured meat under varying drying conditions

干燥 温度/℃	干燥 风速/(m/s)	a	k_0	b	k_1	R^2	RSME	χ^2
50	1.0	0.62220	0.02990	0.40430	0.14650	0.99380	0.02008	0.00052
	0.4	0.42880	0.09220	0.58650	0.02550	0.99730	0.01311	0.00022
55	1.0	0.69200	0.16010	0.33590	0.01910	0.99370	0.01985	0.00051
	0.4	0.45410	0.13900	0.56060	0.02810	0.99580	0.01639	0.00035
60	1.0	0.64380	0.17520	0.38890	0.02880	0.98980	0.02632	0.00089
	0.4	0.48730	0.12790	0.51670	0.03150	0.99880	0.00896	0.00010

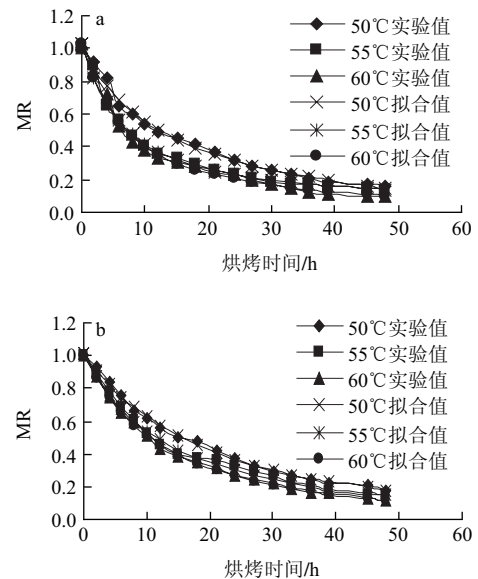
将Two term模型中的干燥常数 k_0 、 k_1 和系数 a 、 b 与温度(T)、风速(V)进行回归分析, 可得模型参数与干燥温度、风速的方程分别为:

$$a=0.0083T+0.6648V-0.1309-0.0062TV(R^2=0.9623) \quad (6)$$

$$k_0=0.1866T-1.0013V-4.8806+0.0183TV-0.0017T^2(R^2=0.9805) \quad (7)$$

$$b=-0.0106T-0.7957V+1.2568+0.0091TV(R^2=0.9524) \quad (8)$$

$$k_1=\exp(-0.2708T+2.4693V+9.1285)(R^2=0.8344) \quad (9)$$



a. 风速1m/s; b. 风速0.4m/s。

图4 不同温度和风速条件下Two term模型预测值与实验值比较
Fig.4 Comparison of the predicted values and experimental values of moisture ratio changes by the Two term model at different drying air temperatures and velocities

通过比较MR的试验值与预测值来验证所建立模型的优劣, 由图4可知, Two term模型的MR实验值与预测值吻合较好, 进一步说明Two term模型可以用来描述广式腊肉的热泵干燥进程。

3 结 论

随着热泵干燥温度或风速的提高,广式腊肉干燥速度加快,表明提高温度或风速可以提高对广式腊肉的干燥能力,减少干燥时间。在干燥初期,干燥速率不断地增大,随着干燥过程的进行,干燥速率增加到某一数值后,则开始减少至平衡,直到干燥过程结束。通过对11种薄层干燥数学模型的比较,Two term模型 $MR=a\exp(-k_0t)+b\exp(-k_1t)$ 在干燥温度50~60℃和风速0.4~1.0m/s范围内能较好地反映广式腊肉在热泵干燥过程中水分比随时间的变化规律。

参考文献:

- [1] 张国琛. 热泵干燥北极虾的物理和感观特性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 235-239.
- [2] 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 脱水蔬菜热泵: 热风组合干燥试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 226-229.
- [3] AKTAŞ M, CEYLAN I, YILMAZ S. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer[J]. Desalination, 2009, 239(1/3): 266-275.
- [4] 应巧玲, 励建荣, 傅玉颖. 食品薄层干燥技术的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(5): 115-119.
- [5] MULET A, BERNA A, BORRAS M, et al. Effect of the airflow rate on carrot drying[J]. Drying Technology, 1987, 5(2): 245-258.
- [6] SARSAVADIA P N, SAWHNEY R L, PANGAVHANE D R, et al. Drying behaviour of brined onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40: 219-226.
- [7] 张厚军, 崔建云, 任发政, 等. 猪通脊肉干燥模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 163-167.
- [8] 段振华, 冯爱国, 向东. 罗非鱼片的热风干燥模型及能耗研究[J]. 食品科学, 2007, 28(7): 201-205.
- [9] 石启龙, 赵亚, 李兆杰. 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.
- [10] CASTELL-PALOU Á, SIMAL S. Heat pump drying kinetics of a pressed type cheese[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44: 489-494.
- [11] VEGA-GÁLVEZ A, MIRANDA M, PUENTE-DÍAZ L, et al. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modeling of the drying curves of the olive-waste cake[J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 7265-7270.
- [12] MENGESH O, ERTEKIN C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77: 119-125.
- [13] 张孔海. 腊肠的储藏保鲜问题与对策[J]. 肉类工业, 2000(2): 21-22.
- [14] AYENSU A. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow[J]. Solar Energy, 1997, 59(4/6): 121-126.
- [15] ZHANG Q, LITCHFIELD J B. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer[J]. Drying Technol, 1991, 9: 383-395.
- [16] WHITE G M, ROSS I J, PONELETT R. Fully exposed drying of popcorn[J]. Trans ASAE, 1981, 24: 466-468.
- [17] HENDERSON S M, PABIS S. Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient[J]. Journal of Agricultural Research Engineering, 1961, 6: 169-174.
- [18] XANTHOPOULOS G, OIKONOMOU N, LAMBRINOS G. Applicability of a single-layer drying model to predict the drying rate of whole figs[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 553-559.
- [19] MAZUTTI M A, ZABOT G, BONI G, et al. Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented and non-fermented sugarcane bagasse[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34: 780-786.
- [20] SHARAF-ELDEN Y I, BLAISDELL J L, HAMDY M Y. A model for ear corn drying[J]. Trans ASAE, 1980, 23: 1261-1265.
- [21] KASSEM A S. Comparative studies on thin layer drying models for wheat[J]. International Congress on Agricultural Engineering, 1998, 6(13): 2-6.
- [22] VERMA L R, BUCKLIN R A, ENDAN J B, et al. Effects of drying air parameters on rice drying models[J]. Trans ASAE, 1985, 28: 296-301.
- [23] GUNHAN T, DEMIR V, HANCIOGLU E, et al. Mathematical modeling of drying of bay leaves[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46: 1667-1679.
- [24] DEMIR V, GUNHAN T, YAGCIOGLU A K. Mathematical modelling of convection drying of green table olives[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98: 47-53.