

花生热风干燥特性及动力学模型

王安建, 刘丽娜, 李顺峰

(河南省农业科学院 农副产品加工研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: 为了给花生热风干燥及设备参数的调整提供理论依据, 探讨了不同干燥风温(35、40、45、50 ℃)、装料量(100、300、500 g)、风速(0.1、0.3、0.5 m/s)条件下花生的干燥特性, 并建立了花生热风干燥动力学模型。结果表明: 随着干燥风温的升高、装料量的减少、风速的增加, 花生干燥时间缩短。花生热风干燥过程初期处于短暂的干燥增速阶段, 之后大部分处于降速干燥阶段, 无明显的恒速干燥阶段, 花生热风干燥的动力学模型符合 Page 方程 $MR = \exp(-rt^N)$, 其中 $r = e^{-3.61669+0.002047T-0.0071W+0.43396V}$, $N = 0.29492+0.00625T+0.00091W+0.16495V$, 该模型预测值与试验值拟合良好, 可用于描述花生热风干燥过程。

关键词: 花生; 风温; 装料量; 风速; 热风干燥; 动力学模型

中图分类号: S375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2014)08-0137-05

Hot Air Drying Characteristics and Dynamics Model of Peanut

WANG An-jian, LIU Li-na, LI Shun-feng

(Institute of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to provide a theoretical foundation for hot air drying of peanut and adjustment of device parameters, the drying characteristics of peanut were investigated under different air temperatures(35, 40, 45, 50 ℃), loading amount(100, 300, 500 g) and air velocities(0.1, 0.3, 0.5 m/s), and a hot air drying dynamics model of peanut was also established. The result showed that the drying time was shortened with the increase of air temperature and air velocity and the decrease of loading amount. The hot air drying procedure of peanut included a short speed-increasing drying stage initially, then mostly a speed-falling drying stage, and had no significant segment of constant speed. The dynamics model was in line with Page equation $MR = \exp(-rt^N)$, where $r = e^{-3.61669+0.002047T-0.0071W+0.43396V}$, $N = 0.29492+0.00625T+0.00091W+0.16495V$. The predicted values of the model were nearly consistent with the observed values, and the drying procedure can be exactly described by the model.

Key words: peanut; air temperature; loading amount; air velocity; hot air drying; dynamics model

花生(*Arachis hypogea* L.) 又称落花生、地豆, 亦称长生果, 是我国四大油料经济作物之一, 也是我国为数不多具有强劲国际竞争力的大宗农产品之一^[1]。花生具有很高的营养价值, 内含丰富的脂肪和蛋白质。刚收获的花生含水量很高, 呼吸作用强, 不易于贮存, 且易发霉, 进而产生致癌性很强的黄曲霉毒素。据统计, 每年花生由于发霉产生黄曲霉毒素造成的损失占总产量的 10%~20%, 造成了严重的经济损

失^[2]。采摘后的花生除少量鲜食外, 绝大多数须经过干燥才能长期存放和加工, 干燥是花生产后加工的重要环节之一, 是保证花生品质和防止霉变的必要手段, 合理的干燥工艺对花生的品质影响很大^[3]。

目前, 我国花生干燥仍以人工翻晒为主, 受场地、天气等环境因素影响较大, 且其干燥周期长, 干燥状态不稳定, 易受污染, 已不能满足我国花生产业发展的需求^[4]。我国个别地区开始采用机械干燥方

收稿日期: 2014-02-10

基金项目: 河南省 2012 年财政支持粮油深加工项目

作者简介: 王安建(1969-), 男, 新疆阿克苏人, 副研究员, 硕士, 主要从事农产品加工与贮藏保鲜研究。

E-mail: nkyjgs@163.com

式干燥花生,干燥机械多为兼用干燥机械,没有配套的控制模拟模块,无法对花生荚果干燥速率、所需干燥时间进行科学控制,易出现干燥不均匀或干燥过度或干燥不充分的情况,难以保证花生的干燥品质^[3]。谢海江^[5]用燃烧秸秆成型燃料的热风炉进行干燥试验,对花生的干燥动力学进行分析,得出影响干燥速度和干燥质量最显著的因素是风温,风速是次要因素。国内对于新鲜带壳花生的干燥鲜有研究,除了筛选合适的设备外,还要进一步做好工艺参数研究,进行相关试验,设计一整套的技术方案,从而及时实施对花生的干燥,有效保障花生品质,这已成为我国花生产业发展亟待解决的问题。鉴于此,研究了新鲜带壳花生的热风干燥特性及干燥动力学模型,以考察不同的干燥风温、风速和装料量对带壳花生干燥特性的影响,并得出描述带壳花生热风干燥的最佳模型,以利于科学控制花生干燥速率、干燥时间,达到较好的干燥效果。

1 材料和方法

1.1 试验原料

试验所用原料为新鲜带壳花生,采购自郑州市农科路枣庄蔬菜市场。花生平均干基含水率为 0.791 7 g/g(105 °C 恒质量法测定^[6])。试验前将新鲜花生放于塑料袋并置于 4 °C 冰箱中保存。

1.2 试验设备

主要仪器:干燥箱(DHG-9240A 型,上海精宏实验设备有限公司,可以通过改变阀门大小控制空气流速)、电子天平(WT30002N 型,常州万泰天平仪器有限公司)、分析天平[TG328A(S)型,上海精密科学仪器有限公司]、风速仪(AVM-05 型,上海君达仪器仪表有限公司)等。

1.3 试验方法

将花生干燥试验的影响因素取为空气温度、空气流速和装载量,分析花生干燥速率与温度、风速和装料量等因素之间的关系,通过预试验,进行试验因素水平设置。

1.3.1 风温对花生干燥的影响测定 准确称取 100 g 鲜花生均匀摊在直径为 30 cm 的网状托盘上(孔径 0.9 mm),调整试验装置的风速为 0.3 m/s,风温分别为 35、40、45、50 °C,将托盘平放于试验装置的干燥室内中心位置。试验开始后,每隔 20 min 测定样品的质量,直到干燥至国标规定的花生果安全储藏标准(水分 $\leq 10\%$)^[7]时,停止干燥,取出冷却后放入保鲜袋中贮存,然后进行下一组试验。每个试验重复 3 次,取平均值。

1.3.2 装料量对花生干燥的影响测定 分别准确称取 100、300、500 g 鲜花生均匀摊在直径为 30 cm 的网状托盘上(孔径 0.9 mm),调整试验装置的风速为 0.3 m/s,风温为 50 °C,此后程序参照 1.3.1。

1.3.3 风速对花生干燥的影响测定 准确称取 100 g 鲜花生均匀摊在直径为 30 cm 的网状托盘上(孔径 0.9 mm),调整试验装置的风温为 50 °C,风速分别为 0.1、0.3、0.5 m/s,此后程序参照 1.3.1。

1.4 干燥参数的计算方法

干基含水率(M_t)按式(1)计算:

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (1)$$

式中, W_t 为干燥至任意 t 时刻的质量(g), G 为干物质质量(g)。

水分比(MR)按式(2)计算:

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

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)^[8]。

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

干燥速率(DR)按式(4)计算:

$$DR = \frac{M_t - M_{t+1}}{\Delta t} \quad (4)$$

式中, DR 为干燥速率[g/(g·h)], M_{t+1} 为 t_{i+1} 时刻的干基含水率(g/g), M_t 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)。

1.5 数据处理与模型分析

采用 Excel 进行数据处理,应用 SPSS 17.0 软件进行模型拟合和回归分析。

2 结果与分析

2.1 风温对花生干燥的影响

由图 1a 可以看出,花生的水分比随着干燥时间的延长呈降低趋势,其中风温越高,花生的水分比曲线越陡,干燥耗时越短,含水率降低越快。干燥风温分别为 35、40、45、50 °C 条件下,花生干燥时间最长的是 35 °C 处理,耗时 1 400 min,明显多于其他温度处理,40、45 °C 处理的干燥时间相差不大,50 °C 处理干燥时间明显最短,耗时 560 min,比 35 °C 处理的干燥时间缩短 1/2 以上。

由图 1b 可知,热风温度越高,花生的干燥速率越大。随着含水量的降低,干燥过程主要分为加速和降速阶段,基本没有恒速阶段,大体符合传统的干燥速率变化规律。这是由于在干燥初期鲜花生中自由水含量高,随着温度升高,自由水蒸发,因而出现短暂的增速过程。继续干燥,随着含水率的降低,干燥速率开始降低,进入降速干燥过程,风温越高,下降越快,这是因为带壳花生整粒干燥时,壳与果粒干燥速度不

同^[9],花生壳是一种多孔结构疏松的物质,易干燥,果粒的水分紧紧结合在内部,排出时还要受到壳的影响,干燥速率取决于内部水分的扩散速度,随着干燥过程的进行,花生水分不断下降,水分蒸发的界面不断向花生内部迁移,而水分迁移距离的增加,必然导致干燥速率的降低^[10]。当干基含水率降到 0.4 g/g 以下时,各个干燥风温下的干燥速率差异很小,此阶段风温高低对干燥速率几乎无影响。

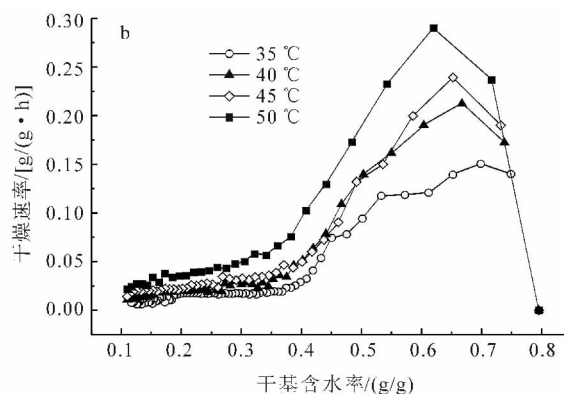
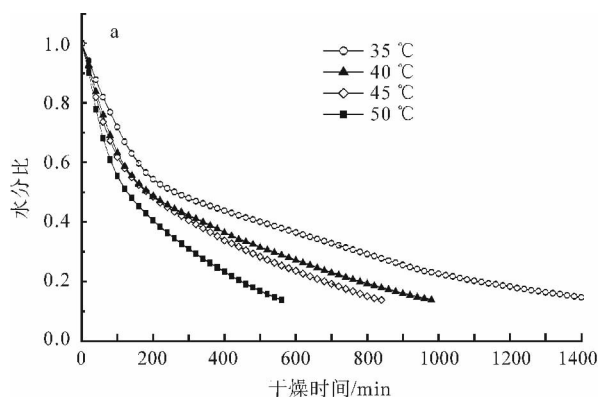


图 1 不同热风温度下花生的水分比曲线(a)和干燥速率曲线(b)

2.2 装料量对花生干燥的影响

由图 2a 可以看出,装料量越小,水分比下降趋势越快,花生达到同一水分比所需干燥时间越短。装料量分别为 100 g、300 g、500 g 时,对应的干燥时间分别为 560 min、740 min、980 min。由此可知,装料量增大,达到安全储藏水分所需的干燥时间也随之增加,但装料量的增加与干燥时间的变化量之间并不成相同倍数增加的关系。

由图 2b 可知,不同装料量条件下,所得到的干燥速率曲线不同。干基含水率较高时即干燥初期,干燥介质供给花生的热量主要用于提高花生温度,用于使花生水分蒸发的热量较少,因此随着装料量的增加,干燥速率变慢。同时,装料量越大,干燥速率曲线越平缓,干燥过程的中后期新增加的恒速干燥阶段越来越明显。这可能是因为装料量增加,花生表面气流速度明显降低,热质传递阻力增大,影响了水分散失^[11]。

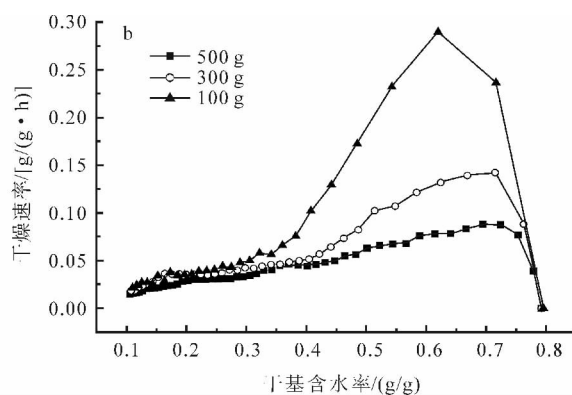
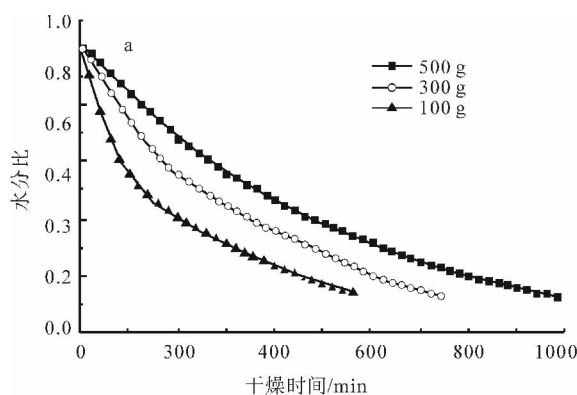


图 2 不同装料量下花生的水分比曲线(a)和干燥速率曲线(b)

2.3 风速对花生干燥的影响

由图 3a 可以看出,不同风速条件下花生的含水率随时间变化曲线的斜率不同,当风速增大时,干燥曲线的斜率变大,干燥至安全储藏水分所需时间也随之减少,其根本原因在于花生中水分的蒸发速度

以及空气的流动速度增加^[12]。当花生处在较高的风速下进行干燥,空气流量比较大,相同干燥时间内花生与热空气接触次数多,花生内水分快速扩散,使得水分的蒸发速度加快。

由图 3b 可知,在干燥初始阶段,干基含水率

较高,随着风速的提高,水分蒸发速度快,干燥速率比较大,但随着时间的延长,不同风速条件下相同含水率的干燥速率之间的差距越来越小,至干燥结束时已基本相同。这说明,在花生干燥后期,

干燥速率由内部水分的扩散速率所控制,风速大小对干燥速率的影响不明显。此时,提高热风风速,不仅不能有效地提高干燥速率,反而会增加干燥能耗。

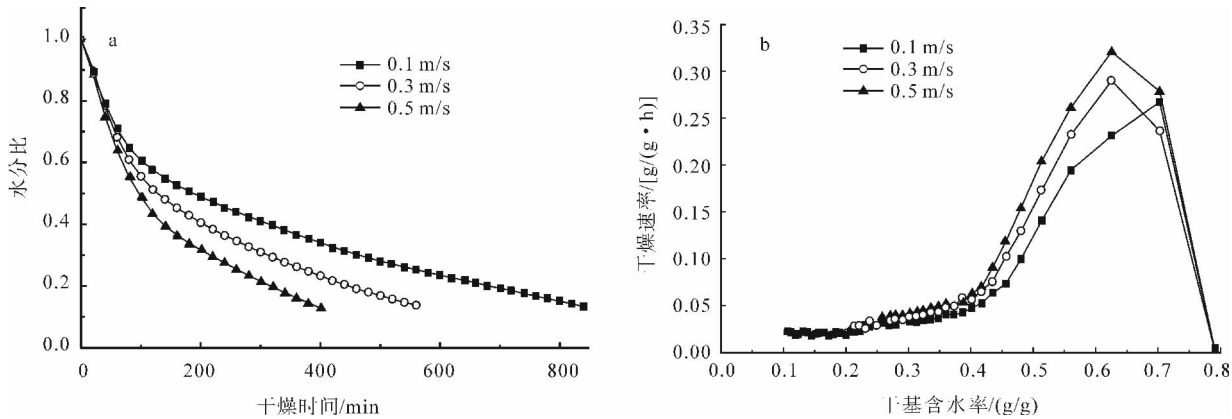


图 3 不同干燥风速下花生的水分比曲线(a)和干燥速率曲线(b)

2.4 花生干燥的动力学模型

2.4.1 动力学模型的拟合 物料干燥是一个复杂的传热、传质过程,建立干燥模型对研究干燥规律、预测干燥工艺参数有重要作用。目前,用来描述农业物料整个薄层干燥过程的常见模型有 3 种^[13-15]。

单项扩散模型: $MR=Ae^{-rt}$, $MR=Aexp(-rt)$;
指数模型: $MR=e^{-rt^N}$, $MR=exp(-rt^N)$;
Page 模型: $MR=e^{-rt^N}$, $MR=exp(-rt^N)$ 。
式中: MR —水分比; t —干燥时间(min); A 、 r 、

N —待定系数。
3 种干燥模型的拟合结果如表 1 所示,由表 1 可知,单项扩散模型、指数模型、Page 模型决定系数(R^2)平均值分别为 0.969 76、0.930 14、0.993 36,均方根误差(RMSE)平均值分别为 0.034 44、0.050 54、0.040 45。其中,Page 模型的 R^2 平均值在这 3 种干燥模型中最大,其 RMSE 平均值虽比单项扩散模型 RMSE 平均值大,但其在不同干燥条件下的所有 R^2 值均大于 0.99,因此,综合考虑,选择 Page 模型作为花生干燥的动力学模型。

表 1 花生干燥模型参数值及其拟合结果

模型表达式	试验序号	干燥常数	R^2	RMSE
$MR=Aexp(-rt)$	1	$A=0.817\ 20, r=0.001\ 36$	0.947 31	0.045 61
	2	$A=0.831\ 34, r=0.002\ 00$	0.947 23	0.047 18
	3	$A=0.853\ 08, r=0.002\ 33$	0.960 46	0.042 02
	4	$A=0.892\ 48, r=0.003\ 66$	0.968 55	0.040 26
	5	$A=0.977\ 43, r=0.002\ 60$	0.995 58	0.016 26
	6	$A=1.023\ 87, r=0.001\ 99$	0.999 20	0.007 22
	7	$A=0.835\ 18, r=0.002\ 27$	0.962 27	0.040 03
	8	$A=0.935\ 10, r=0.005\ 44$	0.977 45	0.036 94
$MR=exp(-rt)$	1	$r=0.001\ 75$	0.859 03	0.074 61
	2	$r=0.002\ 52$	0.876 47	0.072 18
	3	$r=0.002\ 83$	0.907 81	0.064 16
	4	$r=0.004\ 20$	0.943 65	0.053 90
	5	$r=0.002\ 68$	0.994 63	0.017 92
	6	$r=0.001\ 93$	0.998 14	0.011 05
	7	$r=0.002\ 84$	0.891 34	0.067 94
	8	$r=0.005\ 89$	0.970 07	0.042 56
$MR=exp(-rt^N)$	1	$r=0.015\ 21, N=0.663\ 79$	0.990 76	0.046 56
	2	$r=0.018\ 32, N=0.673\ 07$	0.990 24	0.048 73
	3	$r=0.015\ 76, N=0.710\ 84$	0.992 07	0.044 59
	4	$r=0.017\ 61, N=0.741\ 23$	0.994 85	0.037 21
	5	$r=0.002\ 90, N=0.985\ 11$	0.995 13	0.039 28
	6	$r=0.001\ 15, N=1.083\ 14$	0.999 18	0.016 79
	7	$r=0.016\ 09, N=0.707\ 71$	0.990 64	0.048 04
	8	$r=0.019\ 14, N=0.773\ 69$	0.993 99	0.042 42

Page 模型中的干燥常数 r 、 N 是风温、装料量、风速的函数。采用一次多项式来拟合上述常数,令:

$$\ln r = a + bT + cW + dV$$

$$N = e + fT + gW + hV$$

式中, T —热风温度($^{\circ}\text{C}$); W —装料量(g); V —风速(m/s); a, b, c, d, e, f, g, h —待定系数^[16]。

利用 SPSS 17.0 软件对试验数据进行线性回归,求得花生干燥的动力学模型 $MR = \exp(-rt^N)$, 其中 $r = e^{-3.61669+0.00204T-0.0071W+0.43396V}$, $N = 0.29492 + 0.00625T + 0.00091W + 0.16495V$ 。在此基础上对模型进行显著性检验,显著性概率 $P = 0.000 < 0.001$,说明回归方程达极显著水平。由表1可知,回归方程 $R^2 > 0.99$,说明回归方程的拟合程度高,回归效果显著。

2.4.2 动力学模型验证 为进一步验证动力学模型的准确性,选取不同装料量的花生干燥数据进行验证,将试验值与模型值进行比较,结果见图4。由图4可以看出,Page模型的预测曲线与实际值基本拟合,说明Page模型能够较准确地反映花生热风干燥的水分变化规律,可以通过干燥模型对花生的干燥过程进行分析和预测。

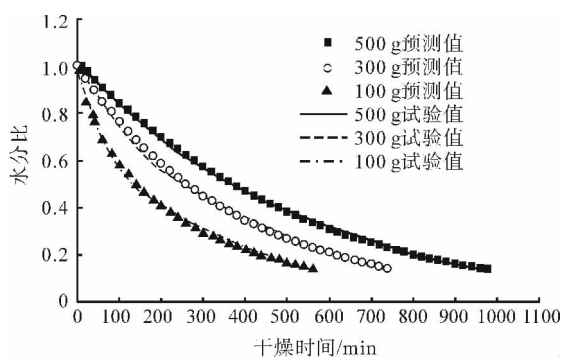


图4 相同条件下试验值与预测值的比较

3 结论

1)花生热风干燥过程前期是短暂的增速干燥阶段,没有明显的恒速干燥阶段,具有显著降速的干燥阶段。随着干燥风温和风速的增大、装料量的减少,水分比降低速率和干燥速率均加大,干燥时间均缩短。

2)在花生热风干燥过程的后期,当干基含水率降到一定程度时,干燥速率由内部水分的扩散速率所控制,此时,风温、风速、装料量对干燥速率无明显影响,因此,在花生干燥后期可以采用保温缓苏的处理办法,使花生内部的水分扩散至表面,使中心与表层水分趋于平衡,然后再继续干燥,这对提高设备利用率、降低能耗有一定效果。

3)花生热风干燥模型符合Page模型: $MR = \exp(-rt^N)$, 其中 $r = e^{-3.61669+0.00204T-0.0071W+0.43396V}$, $N = 0.29492 + 0.00625T + 0.00091W + 0.16495V$, 模型 $P < 0.001, R^2 > 0.99$,说明拟合程度高。经验证试验,结果显示模型的预测值与实测值拟合良好。

参考文献:

- [1] 周瑞宝. 花生加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003:14-15.
- [2] 李建辉. 花生中黄曲霉毒素的影响因子及脱毒技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [3] 颜建春, 吴努, 胡志超, 等. 花生干燥技术概况与发展[J]. 中国农机化, 2012, (2):10-13.
- [4] 刘丽, 王强, 刘红芝. 花生产后初加工技术与机械现状[J]. 农产品加工, 2011(7):50-54.
- [5] 谢海江. 生物质成型燃料热风干燥系统设计与干燥动力学试验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [6] 国家标准局. GB 5497-85 粮食、油料检验水分测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985:223-225.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1532-2008 花生[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008:1-5.
- [8] 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1):276-281.
- [9] 金坚. 计算机模拟带壳花生酥化干燥技术的初探[J]. 广东农机, 1996(4):12-15.
- [10] Purlis E, Salvadori V O. A moving boundary problem in a food material undergoing volume change—Simulation of bread baking[J]. Food Research International, 2010, 43(4):949-958.
- [11] 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.
- [12] 丁正耀, 朱德泉, 陶程云, 等. 高水分小麦干燥特性及其数学模型的研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(9):55-60.
- [13] Jaruk S, John S, Roberts. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot(core and cortex) during convective hot air and isothermal drying[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(1):143-152.
- [14] Arora S, Shivhare U S, Ahmed J, et al. Drying kinetics of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus florida* mushrooms[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2003, 46(3):721-724.
- [15] 黄艳, 黄建立, 郑宝东. 银耳微波真空干燥特性及动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4):362-367.
- [16] 贾清华, 赵士杰, 柴京富, 等. 枸杞热风干燥特性及数学模型[J]. 农机化研究, 2010, 32(6):153-157.