

大豆干燥模型的适应性探讨

李元瑞 姜道年 肖旭林

(食品系) (农工系) (食品系)

摘要 对国外的大豆干燥平衡模型和四个薄层模型进行了模拟分析。在一定模拟条件(大豆初始水分含量小于22%,热风温度22~65℃,相对湿度25%~70%)下,对不同模型指示的水分随干燥时间的变化,降水幅度和通风量之间的关系,以及各个薄层模型稳定工作的临界风量指标进行比较,结果表明,White模型在大豆干燥的适宜工作条件下具有广泛的适应性。通过对我国鲁豆5号的干燥试验结果和利用White模型模拟干燥计算结果的分析比较,认为可借用White模型对鲁豆5号进行干燥分析研究。

关键词 干燥、模拟、大豆、适应性。

中图分类号 S375

70年代至80年代初,国外对大豆的干燥和贮藏做了大量的研究工作,采用先进的模拟方法的研究成果不断涌现^[1]。通过建立干燥模型,不仅可以利用计算机分析干燥设备性能,选择参数,改进设计,为用户提供最佳的管理操作程序,而且可以直观地显示干燥设备内物料干燥过程、水分变化和干燥前峰的移动等动态过程,有效地控制干燥质量。我国的农产物料干燥研究近年来有了较大的发展,尤其是对玉米,小麦的干燥研究,在引进国外模型的基础上提出了一批模拟研究成果,推进了干燥技术的发展。比较而言,在大豆干燥研究方面的文献不多。大豆具有极为广泛的食用、药用、饲用和工业使用价值。我国的大豆生产10多年来有很好的发展,除了传统的用途外,发展新的大豆加工制品,开发植物蛋白前景日渐广阔,在改善我国人民的食物结构方面作用越来越重要。本研究在于对国外所采用的几个模型进行模拟分析,提供可引进借鉴的干燥模型,以期有助于国内大豆干燥研究的发展,更为有效地利用和保护此食物和工业资源。

1 大豆干燥模型

国外对大豆干燥进行研究分析的模型有两类,一是平衡模型,另一类是薄层干燥模型。

1.1 平衡模型

平衡模型由Thompson教授建立^[2],并由其本人和Pircc博士共同用于大豆的干燥研究。平衡模型是一个半经验模型,其基本依据是假设在一定的时间区段内大豆的水分和一定状态的热空气处于平衡状态,从系统的质量平衡和能量平衡建立数学模型,并进行程序求解,此模型由两个基本的数学方程组成,即:

文稿收到日期:1990-04-02.

参加本研究试验工作的还有马宏祥和马文平。

(1) 平衡水分方程

$$M_e = \left[\frac{-\ln(1-RH)}{K[(1.8T+32)+c]} \right]^{1/N}$$

式中 M_e ——平衡水分(%)(干基);

RH ——热风相对湿度(小数表示);

T ——热风温度(°C);

$K=30.5327$; $N=1.2164$; $C=134.136$

(2) 平衡干燥模型

$$t = A \ln(MR) + B(\ln(MR))^2$$

或者

$$MR = \exp\left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4Bt}}{2B}\right)$$

式中 $MR = (M - M_e) / (M_o - M_e)$; MR ——水分比;

M —— t 小时后的大豆水分, (%) (干基);

M_e ——大豆的平衡水分, (%) (干基);

M_o ——大豆的初始水分, (%) (干基);

t ——时间 (h);

$A = -1.862 + 0.00488(1.8T + 32)$;

$B = -42T^{-0.033(1.8T+32)}$;

T ——热风温度, (°C).

1.2 薄层干燥模型

薄层模型是指被干燥的物料充分暴露于一定状态的热风条件下的干燥过程的模拟模型。薄层干燥是各种干燥系统的模拟基础, 薄层干燥的研究是为了探讨在一定风量、风温和湿度条件下被干燥的物料水分随时间变化的规律, 导出薄层干燥方程。当然, 实际的干燥仓或干燥机大多属深层干燥, 但是, 我们可以把它视为由多个薄层的叠加, 所以可以在认识薄层干燥的基础上研究深层干燥。薄层干燥模型中有按照扩散理论建立的理论模型, 也有半经验模型; 有连续通风模型, 换向通风模型; 也有仅适用于有限个温度点的模型。其中使用较为普遍的是连续通风模型。

(1) Overhults 模型^[3]

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp[-(kt)^n]$$

式中 $n = 0.35290 + 0.00136(1.8T + 32)$, ($M_o = 20\%, 23\%, 33\%$);

$\ln k = 11.752 - 7912.7 / T_o$, ($M_o = 20\%$);

$\ln k = 10.906 - 7357.0 / T_o$, ($M_o = 23\%$);

$\ln k = 10.375 - 6779.3 / T_o$, ($M_o = 33\%$);

T_o ——绝对温标 (°R); 其它符号意义同上。

(2) Villa 模型^[4]

当 $M_o > M > M_{x1}$ 时

$$M = M_e + \left[\frac{60t + P_1(M_0 - M_e)^{q_1}}{P_1} \right]^{1/q_1}$$

当 $M_{x1} \geq M > M_{x2}$ 时

$$M = M_e + \left[\frac{60t + P_2(M_{x1} - M_e)^{q_2} - t_{x1}}{P_2} \right]^{1/q_2}$$

当 $M_{x2} \geq M > M_e$ 时

$$M = M_e + \left[\frac{60t + P_3(M_{x2} - M_e)^{q_3} - t_{x2}}{P_3} \right]^{1/q_3}$$

式中 $M_{x1} = 0.40(M_0 - M_e) + M_e$;

$M_{x2} = 0.12(M_0 - M_e) + M_e$;

$t_{x1} = P_1(M_{x1} - M_e)^{q_1} - P_1(M_0 - M_e)^{q_1}$;

$t_{x2} = P_2(M_{x2} - M_e)^{q_2} - P_1(M_{x1} - M_e)^{q_2} + t_{x1}$;

$P_1 = \exp[-2.45 + (6.42)^{1.25} - 3.15RH + 9.62M_a RH^{0.5} + 0.054T + 0.96 - 0.00656V]$

$P_2 = \exp[2.82 + 7.49(RH + 0.01)^{0.67} - 0.03222T - 0.5728]$;

$P_3 = 0.12(M_0 - M_e)^{(q_2 - q_3)}(P_2 q_2 / q_3)$;

$q_1 = -3.98 + 2.78M_0 - [(0.019 / (RH - 0.015)) + 0.0288T + 0.512]$;

$q_2 = -\exp(0.81 - 3.11RH)$; $q_3 = -1.0$;

v —风速(m/min); 其它符号意义同前。

(3) White 模型⁽⁵⁾

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp[-(kt)^n]$$

式中 $n = 0.35290 + 0.00163(1.8T + 32)$; $\ln k = 10.906 - 7357.0 / (1.8T + 32)$;
其它符号意义同前。

(4) Filno 模型⁽⁶⁾

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp[-(kt)^n]$$

式中 $n = 0.5526 + 1.7742 / T$; $\ln k = -3.5187 + 0.333 \times 10^{-1} / T$;
其它符号意义同前。

2 模拟计算分析和试验对比

大豆的干燥过程是一个传热传质过程, 干燥主要去除的是豆粒中的毛细管水和表面游离水。品质本身及其生长的环境, 如土壤、气候、降雨等条件的随机变化决定了谷粒

的生物特性具有统计性特点。显然,谷粒水分分布和它的失水性也具有统计性特点。另一方面,干燥介质——热风在干燥过程中其状态函数,如温度、湿度等也是随时间变化的。所以在建立模型的过程中使用研究随机事件的方法——各种回归分析导出的模型能反映干燥过程的一般规律。

大豆干燥的目的就是把其水分降到安全贮藏水分。干燥的初始条件为原始水分含量、热风温度、湿度、风量等;目标函数为干燥率、表皮龟裂度、子叶破裂度、品质质量和能耗等。研究表明,原始水分为 14%, 16%, 18% 的大豆在 65℃, 60℃, 55℃ 热风条件下干燥 4 h, 其发芽率不受影响。原始水分愈高, 热风温度愈高, 对其发芽率的影响越大; 原始水分为 14% 的大豆在 80℃ 的热风条件下干燥, 原始水分为 16%, 18% 时用 70℃ 的热风干燥, 对其出油率、自由脂肪酸含量、脂肪酸成分以及粗制油过氧值都不会造成影响^[7,8]。White 等人研究了大豆干燥时其表皮龟裂度 (sec) 和子叶破裂度 (cc) 与热风温度和相对湿度的关系后指出, 为了不显著增加 sec 和 cc, 热风温度最好控制在 70℃ 以下, 相对湿度控制在 35% 以上^[9]。据此我们选定大豆原始水分在 22% 以下, 热风温度在 22~65℃, 相对湿度 25%~70% 的多种组合对上述五个模型进行模拟计算。同时, 为了检查模型对通风量变化的敏感性, 也在不同的通风量情况下进行模拟, 模拟计算显示了一些规律性的结果。

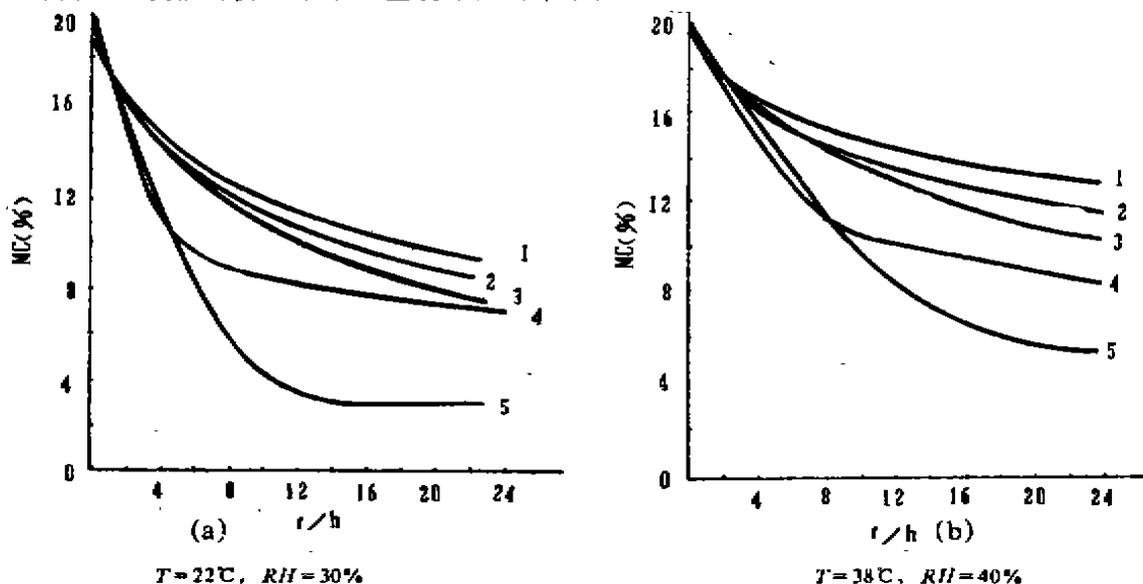


图 1 水分随干燥时间的变化

1—White 模型; 2—Overhults 模型; 3—Filho 模型; 4—Villa 模型; 5—平衡模型

图 1 (a, b) 所示曲线可以看出, 在五个模型的模拟计算结果中, White 模拟预报的结果最为保守, 在其他温度条件下的模拟结果也仍然有与此相同的趋势。由这两个图线还可以看出, 干燥过程前期 Villa 模型的模拟结果和平衡模型的模拟结果接近, 随干燥过程的延续, Villa 模型的干燥曲线偏离平衡模型干燥曲线而逐渐接近其他薄层模型干燥曲线, 而且随着热风温度的提高 (相同的相对湿度), 偏离的时间愈早, 也愈快地

接近其他薄层模型干燥曲线,如图 2 所示。所以,在大豆干燥的前段,水分含量高时可以用平衡模型代替 Villa 模型,而在干燥后期,则 Villa 模型可以被其他薄层干燥模型所取代。

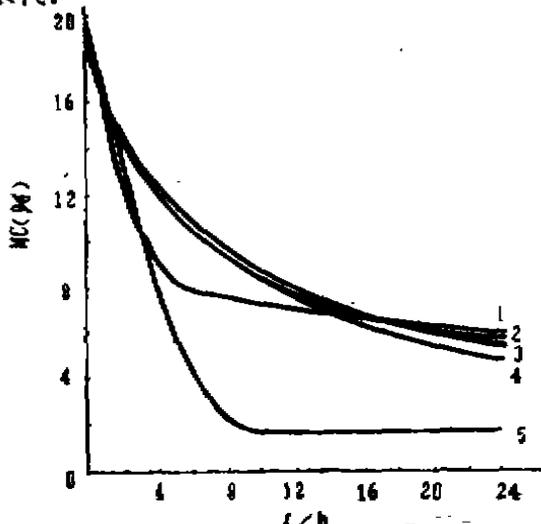


图 2 水分随干燥时间的变化
 $T=50^{\circ}\text{C}; RH=30\%$

- 1—Villa 模型;
- 2—White 模型;
- 3—Overhults 模型;
- 4—Filho 模型;
- 5—平衡模型

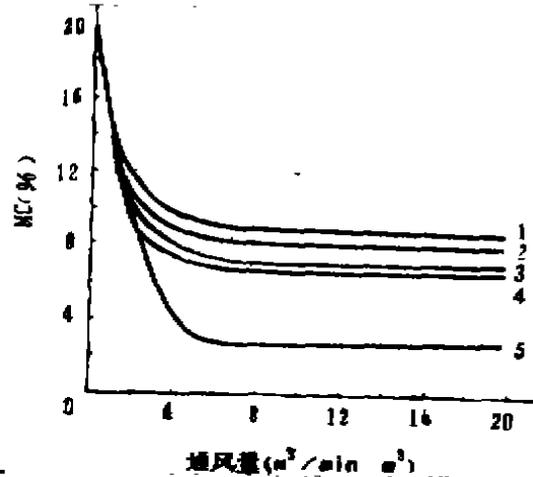


图 3 通风量和降水幅度的关系

$T=32^{\circ}\text{C}; RH=30\%$

- 1—White 模型;
- 2—Overhults 模型;
- 3—Filho 模型;
- 4—Villa 模型;
- 5—平衡模型

图 3 表明在通风量较小 (小于 $4\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$) 的情况下,经过 24h 干燥,大豆的最终含水量随风量的增大而降低,当超过一定的风量值后,大豆的最终水分含量随通风量的增加几乎没有什么变化,而且几个模型显示了类似的模拟结果,这就为我们在特定的热风状态下的干燥操作确定适宜的通风量和风机运行管理,避免因使用过大的风量而导致能耗过高提供了理论基础。

为了更为明显地显示四个薄层干燥的适应性,联合使用平衡模型和薄层模型,在利用薄层模型模拟干燥的程序中,任何条件下,当干燥热风变为饱和态时即转入利用平衡模型的模拟程序,这样可以检验在相同的初始条件下某个模型模拟过程的稳定性和可靠性。

从图 4 可见,当热风温度为 32°C ,供风量达到 $12\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 时,Overhults 模型可以稳定地工作,热风在干燥过程中不会变成饱和态;White 模型在大豆干燥的适宜温度范围内有较好的稳定性,当通风量达到 $11\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$,热风温度高于 25°C 时,使用 White 模型模拟全部的干燥过程是可行的,在 $25\sim 65^{\circ}\text{C}$ 范围内 White 模型模拟的曲线变化平缓,一旦确定了高于上述的风量值,或者是设定了可供应此风量的风机,就可以用 White 模型模拟分析全部干燥过程,White 模型有较好的适应性。

为了检验国内进行大豆干燥研究引进国外干燥模型的现实可能性,我们对在我国种植面积较大的鲁豆 5 号在日产 Temperature-Humidity Chamber 上进行了干燥试验,

并利用 White 模型进行模拟计算。试验系统的调温范围为 $0\sim 120^{\circ}\text{C}$ ，调湿范围为 $40\%\sim 90\%$ 。样品取自西北农业大学农作一站的种子用豆，经过严格挑选，去除表皮龟裂、破损及色泽不正者，然后装入磨口瓶在 4°C 环境中做回湿处理 28d，取得含水量分别为 22%、20% 和 18% 的大豆样品。样本的水分测定采用 105°C 标准烘干法^[10]，发芽率测定按规定^[11]进行，大豆的比热、水分汽化潜热等参数用 Alam^[7]提供的模拟方程进行计算。图 5 显示模拟结果和试验结果二者的趋势有明显的一致性，其他条件下的对照也显示了相同的结果。研究表明，用 White 模型作为研究大豆干燥，揭示大豆干燥规律，分析、设计大豆干燥设备的基础是可行的。

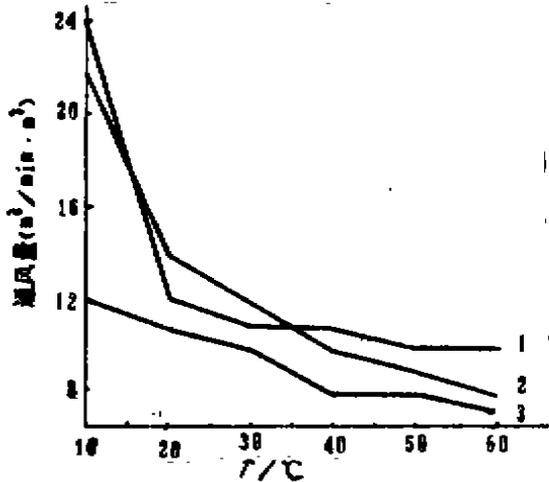


图 4 在一定温度下薄层模型稳定工作的临界风量

$M_0 = 20\%$; $RH = 30\%$

1—White 模型 2—Overhults 模型 3—Filho 模型

3 小结

1) 通过对大豆干燥平衡模型和四个薄层干燥模型的模拟计算分析，White 模型在大豆干燥的适宜温度条件下有较好的一致性。

2) 通过对我国种植的鲁豆 5 号大豆进行的干燥试验和用 White 模型对鲁豆 5 号的模拟计算结果相对照，其表示的干燥率趋势有较好的一致性。

3) 可以引进 White 模型作为开展大豆干燥模拟研究的基础，以开拓国内的大豆干燥研究工作。

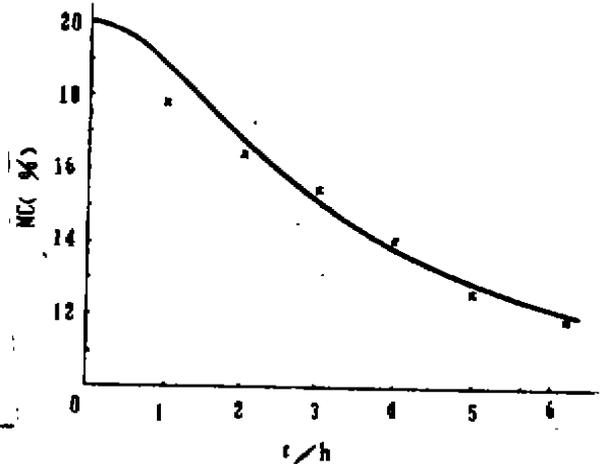


图 5 试验结果和 White 模型模拟结果对照

$T = 45^{\circ}\text{C}$; $RH = 45\%$

参 考 文 献

- 1 Morcy R V, Reener H R, Thompson T L, et al. The present status of grain drying simulation. *ASAE Paper*, 1978 No 78-3009 M149085
- 2 Thompson T L. Predicted performances and optimal design of convection grain dryers. 1967 Ph. D. Thesis Purdue Univ Microfilms Ann Arbor Mich
- 3 Overhults G M, White G M, Hamilton H E, et al. Drying soybean with heated air. *Transactions of the ASAE*, 1973, 16 (1): 112~113
- 4 Villa L G, Roa G, Macedo I C. Minimum air flow for drying soybean seeds in bins with ambient and solar heated air. *ASAE Paper*, 1978 No 78-3017 M149085
- 5 White G M, Bridges T C, Loewer O J et al. Drying Soybean with heated air. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24 (6): 1643~1646
- 6 Filho J B P, Fortes M, Sweet V E et al. Intermittent drying of soybean. *Drying*, 82: 220~226, Hemisphere publishing Corporation, 1982
- 7 Alam A, Shove G C. Simulation of soybean drying *Transactions of the ASAE*, 1973, 16 (1) : 134~136
- 8 Ghaly T F, Sutherland J W. Quality aspects of heated - air drying of soybean. *J stored prod Res*, 1983, 19 (1): 31~40
- 9 White G M, Bridges T C, Loewer O J, et al. Seed coat damage in thin layer drying of soybeans, *Transactions of the ASAE*, 1980, 23 (1): 224~227
10. 粮食. 油料检验. 水分测定法. GB5497~85
11. 粮食. 油料检验. 种子发芽试验. GB5520~85

A Study on Adaptability of Drying Models for Soybeans

Li Yuanri

Jiang Daonian

Xiao Xulin

(Department of Food Science) (Department of Agricultural Engineering) (Department of Food Science)

Abstract A simulation analysis was made of an equilibrium drying model and four thin layer drying models for soybean used abroad. In certain conditions(i. e. initial moisture contents in soybean are less than 22%; the heat wind temperature 22—65℃; and relative humidity 25%—70%), compared moistures indicated by various models with the changes in drying time and relationship between rainfall frequency and amount of ventilation as well as the indexes of critical, ventilation of steady working conditions in each thin layer model. The results indicate that White model is of wide adaptability in the case of suitable working conditions of soybean. It is considered through the analytical comparison of drying test of Lu bean No 5 and the calculation of simulation drying by White model that White model can be used to carry out drying analysis of Lu bean No 5.

Key words drying, simulation, soybean, adaptability