

# 基于干燥时间的稻谷深床干燥工艺参数的优化

王丹阳<sup>1</sup>, 李成华<sup>2\*</sup>, 杨玉芬<sup>1</sup>, 佟玲<sup>1</sup>, 张本华<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学 工程学院, 沈阳 110161; 2. 沈阳理工大学, 沈阳 110168)

**摘要:**利用深床干燥试验台,通过单因素试验和三因素二次回归正交旋转组合试验,建立了热风温度、表现风速和谷层厚度对干燥时间影响的回归方程,分析各因素的单因素效应与交互效应,利用频数分析法进行优化。结果表明:含水率24%的稻谷进行深床干燥时,干燥时间小于180min的概率为95%,干燥热风温度为68~75℃,表现风速为0.58~0.67 m·s<sup>-1</sup>,谷层厚度为19~24cm,优化了稻谷干燥生产的工艺参数,为实际生产经济指标评估提供了依据。

**关键词:**稻谷;深床干燥;干燥时间;干燥参数;

**中图分类号:**S511;S226.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-1700(2008)02-0213-05

## Experiment Study on Influence of Drying Parameters on Drying Duration of Paddy Rice in a Deep Fixed-bed

WANG Dan-yang<sup>1</sup>, LI Cheng-hua<sup>2\*</sup>, YANG Yu-fen<sup>1</sup>, TONG Ling<sup>1</sup>, ZHANG Ben-hua<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Shenyang University of Science and Technology, Shenyang 110168, China)

**Abstract:**Rice drying experiments were conducted in order to optimize the drying duration. A deep drying test bed was used in the experiments including single factor experiment with five factors and five levels. In the study the effects of air temperature, air velocity and paddy thickness on the drying duration were investigated. The results were analyzed with orthogonal rotary regression method to establish the relationship between performance function and each parameter. Single factors and correlative effects on performance were also discussed based on the regression model. An optimum range under 95% probability of drying duration less than 180min can be summarized for air temperature, air velocity and paddy thickness at 68~75℃, 0.58~0.67m·s<sup>-1</sup>, 19~24cm, respectively by frequency analytical method. The study provides useful formation for the evaluation of economic indicator in the practice.

**Key words:**paddy rice; deep fixed-bed drying; drying duration; drying parameters

稻谷收获后的干燥是及时将稻谷降低到安全水分的重要工艺手段。收获季节大量高湿稻谷应季囤积以及稻米市场的激烈竞争都对稻谷干燥提出了高效优质的要求。干燥时间是对干燥节能省时的直接衡量,也是影响干燥质量的重要因素<sup>[1,2]</sup>。ZHANG 和陈坤杰等<sup>[3-7]</sup>将干燥时间作为调控参数,以调控干燥时间和其他工艺参数来控制稻谷干燥终了水分和干燥质量,得出干燥时间及其他干燥参数与干燥指标间的系列关系。刘建伟等<sup>[8]</sup>将干燥时间作为评价指标进行研究,曹崇文和王桂湘等<sup>[9,10]</sup>也将干燥时间间接应用到干燥速率的评价指标中。

GB1350-1999 规定稻谷收购的含水率标准为 14.5%(wb),含水率每超 0.5%,其纳粮总量将扣除 0.75%。除稻谷干燥终了含水率以外,生产中通过控制干燥时间的长短还可以控制干燥能耗和干燥质量<sup>[11,12]</sup>。但是,以往干燥时间的经验数据相对单一,很难满足当前稻谷干燥品种区域化的要求,而且对于不断发展的多种干燥新设备、新工艺也较难适应。因此,本研究将干燥时间作为评价指标,应用称重法通过在线即时测量稻谷含水率以达到控制整个干燥过程的目的。通过试验研究,探讨深床干燥工艺参数对干燥时间指标的影响规律,并进行工艺参数优化,为实际生产效率及经济指标评估提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验所用稻谷品种为辽宁主产稻辽粳 294。稻谷去杂后,其原始含水率按烘箱法进行测定,5 次检测的平

收稿日期:2007-09-11

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(20052121)

作者简介:王丹阳(1977-),女,沈阳农业大学讲师,博士研究生,从事农产品加工工程研究。\*通讯作者 Corresponding author:李成华(1958-),男,沈阳理工大学教授,博士,从事机械设计及理论研究。

均值为 12%~14%(wb)。试验前 48h,将稻谷按各试验要求调制到要求水分后,用双层塑料袋密封,每隔 3~4h 翻动 1 次,以保证谷温与环境温度一致及其水分的平衡。

1.2 方法

试验于 2005 年 2 月在沈阳农业大学工程学院物料实验室进行。试验环境温度 9~11℃,相对湿度 43%~52%。试验前 1h,启动稻谷深床干燥试验台,按试验参数调节风量及风温,使其达到预定值并稳定后,将预干燥稻谷装入干燥筒并开始计时<sup>[13]</sup>。此后每隔一定时间,用专用取样器和热电偶对干燥筒各层各测点的稻谷进行温度和含水率的测量。设定采样时间间隔为:干燥初期 5~10min,前期 15min,中后期 20min,后期 30min。直至干燥筒顶层各测点的稻谷含水率低于 14%(wb)时停止试验和计时。计时时间值即为干燥时间。

选取稻谷初始含水率、热风温度、表现风速、谷层厚度及缓苏时间为单因素试验因子,其因子水平如表 1。考察单因子对干燥时间的影响时,除缓苏时间取 0 值外,其余各因素均固定在设定范围的中间水平。通过 25 次试验(4 次中间水平重复试验),得到各单因子对干燥时间的影响规律如图 1。选取单因素试验中影响干燥时间的主要因素热风温度、表现风速、谷层厚度作为二次回归正交旋转试验因子。根据单因素试验的结果,确定因素水平编码如表 2。

表 1 试验参数  
Table 1 Experiment parameters

试验参数 Factor	单因素试验点 Values for single factor experiment				
初始含水率 $W/\%$ Original moisture content	18.32	21.80	23.60	25.42	28.70
热风温度 $T/^\circ\text{C}$ Air temperature	40	48	60	72	80
表现风速 $V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ Air velocity	0.30	0.45	0.60	0.70	0.80
谷层厚度 $h/\text{m}$ Paddy thickness	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50
缓苏时间 $t/\text{min}$ Tempering time	0	10	20	30	60

表 2 因素水平编码  
Table 2 Coding of factor level

编 码 Code	$x_1$ 热风温度 Air temperature $/^\circ\text{C}$	$x_2$ 表现风速 Air velocity $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$x_3$ 谷层厚度 Paddy thickness $/\text{cm}$
+1.682	80	0.8	50
+1	72	0.73	40
0	60	0.63	30
-1	48	0.53	20
-1.682	40	0.45	15
$\Delta$	12	0.1	10

2 结果与分析

2.1 单因素试验分析

2.1.1 谷层厚度及表现风速对干燥时间的影响 测定结果表明(图 1a),干燥时间随谷层厚度的增加而延长,二者之间近似于线性关系。谷层厚度增加,相应需求干燥能增加,因而在其他条件相同时,要获得较高的干燥总势能,必要延长干燥时间。测定结果表明(图 1b),干燥时间随着表现风速的提高而逐渐减小,0.3~0.4 $\text{ms}^{-1}$  风速段干燥时间降幅较大,之后降幅逐渐减小。

2.1.2 热风温度及稻谷初始含水率对干燥时间的影响 测定结果表明(图 1c),其他条件一定时,随干燥风温的增加,干燥时间逐渐减少。这是由于稻谷在高温干燥介质条件下所获得的表层水汽化能和内部水分扩散的迁移能增加,所以总体干燥速度加快,干燥时间缩短。总体上,风温由 40℃上升到 50℃时,干燥时间缩短幅度较大,此后随风温增加,干燥时间基本呈线性小幅缩减。测定结果表明(图 1d),稻谷干燥时间随稻谷初始含水率的升高而延长。初始含水率的提高使得稻谷需要烘干的自由水和结合水总量增多,当干燥强度不变时,必需延长干燥时间来获取所需的干燥总能耗。

2.1.3 缓苏时间对干燥时间的影响 试验在各层稻谷含水率约为 14%( $\pm\Delta < 1\%$ )时,均设置缓苏环节。将干燥过程中增设的缓苏时间与干燥设备的纯作业时间之和定义为稻谷干燥时间,将该过程中干燥设备纯作业时间定义为烘干时间。测定结果表明(图 1e),缓苏时间正比于干燥时间却反比于烘干时间。试验数据表明,当缓苏时间超过 40min,延长缓苏时间可以有效提高干燥设备的利用率,不仅节约能耗,降低干燥成本,还可以改善干燥后稻谷品质<sup>[13]</sup>。

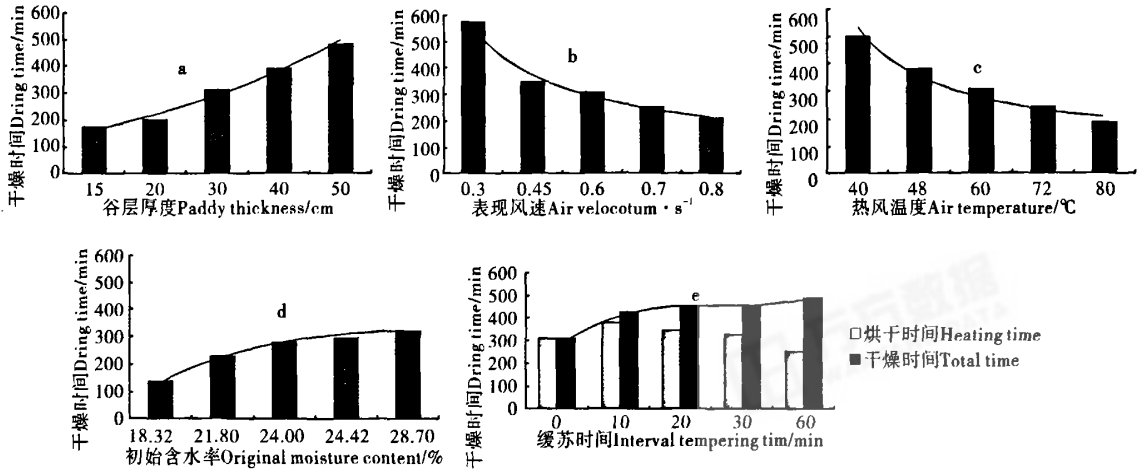


图 1 各单因子对干燥时间的影响  
Figure 1 Effect of each parameter on drying duration

2.2 稻谷深床干燥二次回归正交旋转试验结果与分析

根据二次回归正交旋转设计的 23 次组合试验所得干燥时间的测量结果,求得干燥时间与影响因素间关系在编码空间的回归方程。对方程进行方差分析,结果显示方程拟合较好且显著( $\alpha=0.01$ )。对回归系数进行显著性检验后剔除不显著的因素,得编码空间内的回归方程为:

$$t=243.8193-67.1017x_1-29.0718x_2+84.5583x_3-13.7500x_1x_2-44.5x_2x_3+22.1225x_1^2+9.1281x_2^2+13.0442x_3^2$$

2.2.1 单因素分析 热风温度与干燥时间的关系表明(图 2),干燥时间随风温的增加而减小。以表现风速和谷层厚度处于 0 水平( $V=0.63m \cdot s^{-1}, h=30cm$ )为基准,谷层厚度不变,当表现风速增大时,干燥时间的降幅速率与风温正相关,当表现风速减小时,干燥时间的降幅速率与风温负相关。

表现风速对干燥时间的影响表明(图 3),当  $x_3=0$  或  $x_3=1(h=30cm$  或  $h=40cm)$  时,表现风速与干燥时间呈正相关;当  $x_3=-1(h=20cm)$  时,表现风速与干燥时间呈负相关。说明谷层厚度达到一定界值以上,增大风速有助于加快干燥速度,节省能耗,且谷层越厚,省时节能的作用越明显;而当谷层厚度低于某一界值时,由于此时静风压损失很小,若继续增大风速,则不利于谷层能量积存,反而会延长干燥时间,增加能耗。

2.2.2 交互作用分析 固定一个因素为零水平,据回归方程绘制两因素交互作用曲面(图 4-图 6)。图 4 表明,二

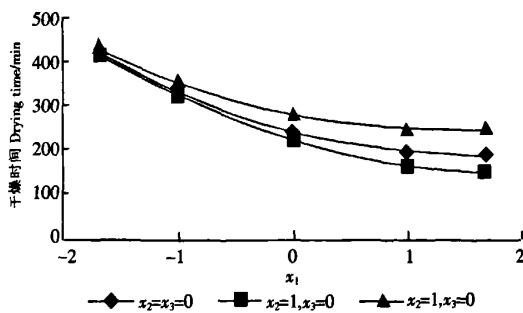


图 2 热风温度对干燥时间的影响

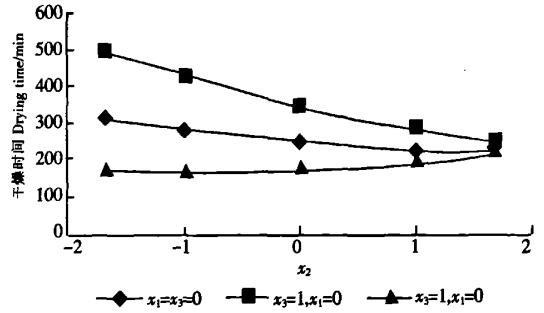


图 3 表现风速对干燥时间的影响

Figure 2 Impact of air temperature on drying duration Figure 3 Impact of air velocity on drying duration

者交互作用中,谷层厚度对干燥时间的影响更大。谷层越厚,风温越低,干燥时间越长;谷层越薄,风温越高,干燥时间越短。谷层厚度较高时,小幅增温对干燥时间影响不大,当温度较高时,其变化对干燥时间影响甚微。图 5 表明,风速越大,风温越高,干燥时间越短,节能越好,反之亦然。当风温低于 0 水平( $T<60^\circ C$ ),提高风速对干燥时间影响不大,只有当风温在 0 水平以上时,风温越高,风速越大,缩短干燥时间的优化作用才越明显。在热风温度和表现风速的交互作用对干燥时间的影响中,热风温度的变化对该指标的影响更大。图 6 表明,风速越

小,谷层越薄,干燥时间越短,风速越大,谷层越厚,干燥时间越长。当谷层厚度大于1水平( $h>40\text{cm}$ ),增大风速可有效缩短干燥时间;当谷层厚度低于-1水平( $h<20\text{cm}$ ),小幅增大风速对干燥时间影响甚微。当风速大于某一限值,谷层厚度的变化对干燥时间影响甚微。当谷层厚度约处于-0.15~-0.8区域内( $24\text{cm}<h<31\text{cm}$ ),即当静风压损失平衡时,风速的变化对干燥时间的影响甚微。

2.3 工艺参数的优化结果与分析

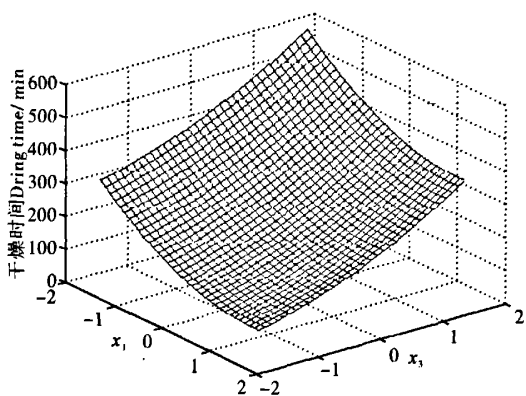


图4 热风温度和谷层厚度与干燥时间的关系

Figure 4 Drying duration with air temperature and paddy thickness

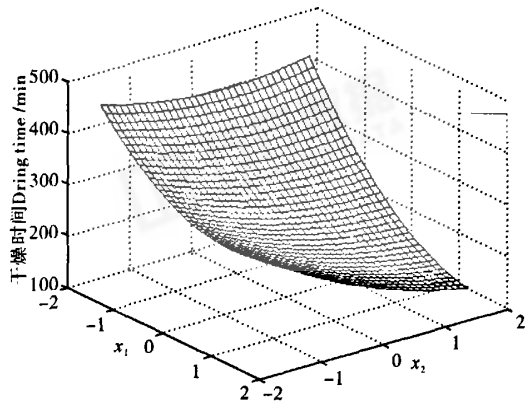


图5 热风温度和表现风速与干燥时间的关系

Figure 5 Drying duration with air temperature and air velocity

根据建立的回归方程,通过计算机模拟寻优。每个因素取5个水平:±1.682,±1和0,对相应125个方案寻优,得出水稻深床干燥时间小于180min的34个方案中各变量取值与频率分布(表3)。由表3可知,在试验条件下,当热风温度、表现风速及谷层厚度分别在68~75℃,0.58~0.67m·s<sup>-1</sup>,19~24cm范围内,其干燥时间小于180min的概率为95%。

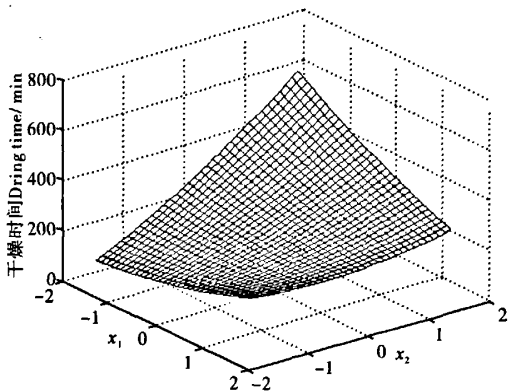


图6 表现风速和谷层厚度与干燥时间的关系

Figure 6 Drying duration with air velocity and paddy thickness

表3 干燥时间小于180min的变量数值与频率  
Table 3 Variable values and frequencies of drying duration less than 180 min

编码 Code	因素频数 Factor frequency		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
-1.682	0	7	15
-1	2	7	13
0	6	6	4
1	13	6	2
1.682	13	8	0
加权均数 Mean	0.967	0.020	-1.066
标准误差 Standard error	0.132	0.219	0.128
95%的分布区间 Interval with 0.95 fiducial probability	(0.708, 1.226)	(-0.409, 0.449)	(-1.317, -0.815)
工艺参数范围 Rang of technological parameter	(68, 75)	(0.58, 0.67)	(19, 24)

3 结论与讨论

采用二次回归正交旋转组合设计,进行了稻谷深床干燥时间的试验研究,建立了影响因素(热风温度、表现风速、谷层厚度)与干燥时间之间关系回归数学模型,为研究稻谷干燥生产效率和经济指标评价提供了基础。通过频数分析得出,稻谷的原始水分约为24%时,干燥热风温度为68~75℃,表现风速为0.58~0.67m·s<sup>-1</sup>,谷层厚度为19~24cm,其深床干燥时间小于180min的概率为95%。

郑先哲将干燥时间作为控制因子,研究分析了稻谷爆腰增率与干燥时间之间的关系,得到了干燥时间内干燥常数与干燥爆腰增率之间的关系方程,借此可确定在要求的爆腰增率范围内确定每级干燥段的干燥时间,并预测稻谷在各种干燥条件的爆腰增率<sup>[1,6,7]</sup>;陈坤杰研究分析了稻谷深层干燥各层谷温、含水率随干燥时间变化的规律,得出稻谷深床干燥过程中,各谷层温度和含水率随干燥时间的变化均呈现明显的分层型<sup>[8]</sup>;刘建伟研究表明在其他干燥条件相同时,稻谷谷层越厚,干燥速度越慢,干燥时间越长,谷层越薄,搅拌时间间隔越长,干燥时间越短,但爆腰率也随之增加<sup>[9]</sup>。曹崇文等以降水幅度、水分蒸发量和干燥能力等指标间接体现了对干燥时间的分析,得出了顺逆流干燥适用于初始含水率较高的谷物,可以采用较高的干燥风温,逆流干燥适用于初始含水率较低的谷物,不能采用较高的干燥风温<sup>[10]</sup>。顺混流干燥与顺流和混流干燥相比,具有爆腰率增值较低、生产率高、单位热耗低的特点<sup>[9]</sup>。本研究将干燥时间作为干燥指标进行研究,得到了要求条件下的干燥参数与该指标间的数学模型。对于具有大滞后、非线性特点的稻谷干燥,干燥时间应作为干燥指标还是控制因素,虽然没有统一的共识,但以上研究都以优化稻谷干燥过程为核心,且为全面分析和模拟稻谷深床干燥非线性的动态过程提供了必要的理论和试验基础。

#### 参考文献:

- [1] 郑先哲,安一禄,王成芝.高低温组合干燥工艺试验研究[J].中国农机化,1997,(1):210-213.
- [2] 朱文学,连政国,张玉先,等.谷物干燥性能指标权重的研究[J].农业机械学报,2000,31(1):72-75.
- [3] ZHANG Q H, SIMON X Y. Prediction of performance indices and optimal of rough rice drying using neural networks [J]. Biosystems Engineering, 2002, 83(3): 281-290.
- [4] 陈坤杰,李娟玲,杨明毅,等.稻谷固定床式深层干燥试验研究[J].农业机械学报,2001,32(2):58-61.
- [5] 衣淑娟,李渤海,王金武.水稻干燥后爆腰规律试验研究[J].农机化研究,1999,(1):76-77.
- [6] 郑先哲,王成芝.水稻爆腰增率与干燥关系的试验研究[J].农业工程学报,1999,15(2):194-197.
- [7] 郑先哲,周修理,夏吉庆.干燥条件对稻谷加工品质影响的研究[J].东北农业大学学报,2001,32(1):48-52.
- [8] 刘建伟,徐润琪,包清彬.稻谷自然能干燥特性与品质的研究[J].粮食储藏,2001,(5):37-41.
- [9] 王桂湘.水稻顺混流干燥工艺的研究[J].农业工程学报,2000,16(2):109-202.
- [10] 曹崇文,黄兴元.谷物干燥工艺的试验研究[J].北京农业工程大学学报,1995,15(2):51-57.
- [11] 王 钰.现代粮食干燥装备对谷物烘干的贡献[J].农机科技推广,2004,(9):10-11.
- [12] 曹崇文.对我国稻谷干燥的认识和设备开发的建议[J].农业机械,2000,(10):10-12.
- [13] 王丹阳,李成华.水稻深床干燥工艺参数对爆腰增率影响的试验研究[J].沈阳农业大学学报,2005,36(4):482-484.

[责任编辑 亓 国]