

# 荔枝红外干燥均匀性与果壳孔隙分形色变研究\*

徐凤英 陈震 李长友 廖建源

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 通过含水率试验拟合, 比较了荔枝红外干燥过程各果含水率变化的均匀性, 应用 Image-Pro、SPSS 软件, 分析对比了干燥不同时刻荔枝果壳孔隙率均值差异及分形维数变化, 由相对色差测定, 研究了果壳表面色变过程。结果表明: 荔枝红外干燥, 各果含水率变化过程不均。初始质量较小果, 含水率变化速率较大; 随干燥时间增加, 各果含水率变化速率减小, 后期差距加大; 干燥不同时刻果壳孔隙率随含水率降低显著性变化, 其均值由 0.519 降至 0.381、0.276、0.184, 但分形维数由 1.486 升至 1.674、1.708、1.800。荔枝红外干燥各果壳表面, 初始 DL、Db 值变化大, 后期变化小。

**关键词:** 荔枝 果壳 红外干燥 均匀性 孔隙分形

**中图分类号:** S375; S667.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0222-06

## 引言

荔枝为多层结构难加工型果<sup>[1-2]</sup>, 红外干燥可降低其受热失水时的传热阻力, 提升干燥效率与品质, 正日益受到关注<sup>[3-4]</sup>。受果体初始状态及果壳孔隙水分跨层输运阻滞影响<sup>[5-6]</sup>, 荔枝红外干燥性能与品质不如可切片型果蔬<sup>[2-4]</sup>。开展荔枝红外干燥均匀性与果壳孔隙结构及色差品质变化研究, 利于揭示制约其红外干燥性能与品质提升的内在关联, 为综合提升荔枝干燥性能与品质提供理论依据。目前研究报道较少, 仅有物料红外干燥失水动力、荔枝鲜果外观色差品质、孔隙结构等分散的相关报道<sup>[1-9]</sup>。

近年来, 一些研究者应用经验与仿真模型, 研究了物料干燥过程的热质传输动力及其过程阻滞作用<sup>[3-7]</sup>, 已发现势场动力不均引起受干物料失水品质不均现象<sup>[8]</sup>, 而基于色差测定, 品质研究者对鲜荔枝的果壳色变过程进行了量化比较<sup>[1,9]</sup>。基于介质微观定量化指标与其物理宏观力学特性间的关联<sup>[10]</sup>, 以分形理论研究多孔介质结构体的孔隙率<sup>[10-12]</sup>、渗透性能<sup>[9,13-15]</sup>亦受到极大关注, 已取得一些应用成果<sup>[9-15]</sup>, 这为从新的角度解释荔枝干燥加工中的失水不均、果壳硬脆等复杂热力学现象提供了较大帮助。因以上研究均未考虑荔枝红外干燥均匀性与果壳孔隙结构、外观色差品质形成间的相互关联, 尚难揭示制约荔枝红外干燥性能与果干品

质形成间的结构与物理作用。因此本文通过含水率试验拟合, 比较红外干燥过程荔枝各果含水率变化的均匀性, 应用 Image-Pro、SPSS 软件, 分析对比干燥不同时刻荔枝果壳孔隙率均值差异及分形维数变化, 由相对色差测定, 研究果壳表面色变过程, 为其他多层结构果蔬红外干燥均匀化研究提供参考。

## 1 试验材料与测试方法

### 1.1 供试材料

供试荔枝产于广州市从化区, 为大小较接近的无损伤白蜡鲜果。

### 1.2 干燥试验装置与试验过程

荔枝红外干燥试验装置如图 1 所示, 自行设计而成。该装置内置有功率为 300 W 的红外辐射线源(深圳山耐特公司), 该辐射线源长 300 mm, 距干燥试验荔枝 120 mm。试验时, 荔枝置于不锈钢制托盘中, 托盘内径为 180 mm, 托盘下置 50W 直流电动机, 该电动机轴带动转动轴杆, 可连续拨动托盘中的荔枝。荔枝干燥过程整体实时质量由 YZC-212 型称量传感器(广州电测仪器厂)测定, 并经 PT650F 型称量显示器(珠海志美电子有限公司)采集至计算机中, 由自行设计的在线测试程序实时记录试验荔枝的整体质量。

试验初始时, 先在室温下依序测定各果质量及相对色差, 再将待干燥荔枝同时放入干燥腔内的托盘上, 启动电源开关进行红外干燥。当荔枝干燥相

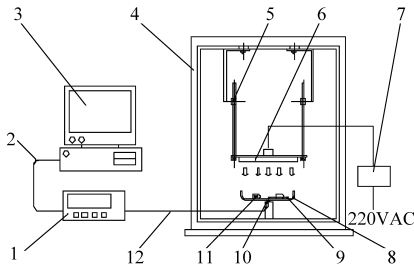


图 1 荔枝红外干燥装置示意图

Fig. 1 Schematic of litchi infrared drying equipment

1. 称量显示器 2. 通讯电缆 3. 计算机 4. 干燥腔 5. 高度调节装置 6. 红外辐射线源 7. 电源开关 8. 托盘 9. 转动轴杆 10. 称量传感器 11. 荔枝 12. 传感器电缆

邻时刻失水近整体质量的 20% 时,同时取出各试验果,依序测定各果质量、相对色差,测试时间为 2 min。各果测试完后同时放入托盘上继续进行干燥。上述测定时刻依荔枝含水率减小而分别计为  $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  共 4 个时刻,其中,  $T_0$  时刻对应荔枝鲜果,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  时刻分别对应荔枝干燥时间为 161、416、1 141 min。

荔枝红外干燥过程不同时刻的各果质量均由 JJ1000 型电子天平(美国双杰兄弟公司)测定,并由 CR-10 型色差计(柯尼卡美能达公司)测试其相对色差  $DL$ 、 $Da$ 、 $Db$  值。各果色差测试均取在荔枝各果壳表面的头部尖点区域,对比样板白目标颜色值分别为 89.8、9.1、-9.6。荔枝红外干燥不同时刻各果经质量、相对色差测定后,在  $T_0 \sim T_3$  各时刻试验荔枝果中分别选出 2 个果备用,其余继续进行红外干燥。荔枝红外干燥均匀性及色差比较性测定试验序号均以其时刻符号下角标数字与重复数组命名。荔枝绝干基含水率由 DHG-9070B 型干燥箱(上海安亭科学仪器有限公司)进行 105℃ 连续 24 h 加热干燥后测定获得。

### 1.3 荔枝果壳电镜观察处理

在  $T_0 \sim T_3$  各时刻干燥试验备用果中,进一步挑选出各自有代表性的一个果。其中  $T_1 \sim T_3$  时刻试验果的干基含水率分别为 304.64%、195.07%、92.68%。在选出的各时刻果的中间表面,分别切下约 4 mm × 3 mm 大小的果壳试样。对切取的  $T_0$  时刻鲜果壳试样,以 0.1 mol/L 磷酸缓冲液配置的戊二醛溶液固定 3 h,经相应的磷酸缓冲液洗涤后,用梯度酒精分 5 级脱水,再与切取的  $T_1 \sim T_3$  时刻荔枝果壳试样一起以断面制片装台,经 HUS-5GB 型真空喷镀仪(日本 HITACHI 公司)临界点干燥及 IB-5 型离子溅射仪(日本 EDAX 公司)镀膜后,在 XL-30ESEM 型扫描电镜(荷兰 Philips- FEI 公司)下进行果壳孔隙结构试验观察分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 荔枝各果红外干燥均匀性比较

对经  $T_0 \sim T_3$  各时刻过程质量重复测定的 6 个试验荔枝分别进行 Excel 数据处理,可得到荔枝红外干燥含水率分时变化均匀性比较图,如图 2 所示。

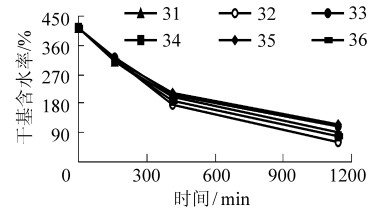


图 2 荔枝红外干燥含水率分时变化均匀性比较

Fig. 2 Comparison of the moisture content uniformity of litchi at different time during infrared drying

由图 2 可知,荔枝红外干燥,各果含水率的变化速率存在较明显的过程失水不均。初期各果含水率大小相近,含水率的变化速率差异小,但随干燥时间增加,各果含水率逐渐减小而相互分离,其含水率的变化速率亦随之快速减小,两端极值间的差距加大;含水率的变化速率在干燥过程不同时间段亦出现波动,该波动在干燥前期较为显著,但在干燥后期,各果含水率的变化速率波动减弱,部分果出现了相近的含水率变化速率。这表明荔枝个体间的初始状态差异可能较大程度地影响了干燥均匀性,需进一步量化比较。

为进一步量化比较荔枝果的个体差异对其干燥均匀性影响,本文应用 Excel 软件,对图 2 所示试验荔枝进行含水率-时间的指数函数最小二乘拟合<sup>[3-4,7]</sup>,即

$$Y_M = A_M e^{-k_M t} \quad (1)$$

式中  $Y_M$ 、 $A_M$ ——干基含水率的当前值、系数值, %  
 $k_M$ ——时间影响系数,  $s^{-1}$   $t$ ——时间, s

由式(1),分别对图 2 各果含水率及其均值进行时间指数函数拟合。

根据相近初始质量分组,对图 2 各果进行 3 组划分,由 SPSS 软件的单因素分析法,分别对各果已拟合的  $A_M$ 、 $k_M$  系数进行组间差异比较,可获得不同初始质量荔枝红外干燥含水率-时间指数函数最小二乘拟合系数差异,如表 1 所示,表中  $R_M^2$  表示含水率拟合方程决定系数。

由表 1 可知,荔枝红外干燥,不同初始质量,各果与其均值含水率时间指数函数最小二乘拟合系数的  $k_M$  值较接近,但二者间的  $A_M$  值差异较大。其中小质量果系数  $A_M$ 、 $k_M$  整体偏大,而大质量果则相反。初始质量相近果,其拟合系数  $A_M$ 、 $k_M$  亦有小幅波动。各果含水率的变化速率较难均匀一致,尤其是初始

质量较小果,其含水率的变化速率快于质量较大果。荔枝不同初始质量含水率-时间指数函数的最小二乘拟合系数  $A_M$ 、 $k_M$  在相近质量分组的组间差异均不显著。这说明荔枝红外干燥各果失水不均受其初始质量影响较大;同时,该失水不均也与其果体的结构、形态在红外辐射势场作用下的热质传输动力变化存在关联,由此引起了果体内部水分的跨层失水阻力增大,需进一步探讨。

表1 不同初始质量荔枝红外干燥含水率-时间指数函数最小二乘拟合系数差异

Tab.1 Coefficients of the least squares fit exponential function of litchi with different initial moisture content during infrared drying

试验序号	初始质量/g	含水率拟合方程系数		
		$A_M/\%$	$k_M/s^{-1}$	$R_M^2$
31	17.75	75.869	0.0015	0.989
32	17.80	77.652	0.0017	0.993
33	20.20	74.570	0.0011	0.970
34	20.51	75.298	0.0014	0.985
35	20.79	73.851	0.0011	0.969
36	20.84	74.785	0.0013	0.984
均值	19.65	75.338	0.0014	0.982

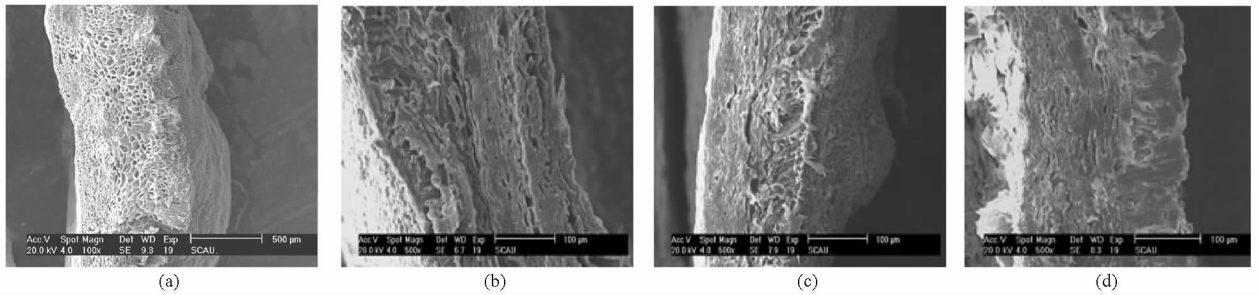


图3 荔枝红外干燥不同时刻果壳断面的扫描电镜图

Fig.3 SEM pictures of the shell cross section at different time during litchi infrared drying

(a)  $T_0$  (b)  $T_1$  (c)  $T_2$  (d)  $T_3$

孔隙率进行综合权重折算<sup>[5]</sup>,结合 Image-Pro 软件<sup>[11-12]</sup>对图3所示的  $T_0 \sim T_3$  各时刻果壳断面的不同区域孔隙率分别进行测定。测定时,先对上述干燥试验  $T_0 \sim T_3$  各时刻的果壳断面试样分别进行扫描电镜图片二值化处理及选择框选区域面积

## 2.2 果壳断面孔隙结构及分形演变

为揭示果壳孔隙阻滞作用对荔枝红外干燥过程失水动力不均的影响,本文对荔枝红外干燥  $T_0 \sim T_3$  各时刻果壳断面的扫描电镜试样进行拍照观察。为实现果壳断面图像全景拍照观察,其中  $T_0$  时刻果壳试样电镜观察倍数为 100,其余  $T_1 \sim T_3$  时刻倍数为 500,如图3所示。

由图3可知,鲜荔枝果壳断面厚度较大,孔隙结构清晰,其邻近内外表面孔隙数较少,而果壳中间断面层孔隙数多,并由散状分布的网络状薄壁细胞与尺寸大小不一的维管束贯穿组成<sup>[1,5,16]</sup>。随着干燥过程进行,荔枝果体含水率逐渐降低,果壳断面孔隙结构内水分不断蒸发,孔隙持续收缩减少。中间区域的维管束开始大量消失,仅留下局部不均匀的孔隙区;邻接内外表面处的孔隙虽发生收缩,但其变化较小且较滞后。在干燥后期,其邻接内外表面的果壳断面孔隙进一步减小,中间区域的孔隙骨架物质产生粘结,并出现不同的团块、皱曲,在局部区域出现断裂形孔隙。

由于果壳断面在邻接内、外表面的孔隙形态显著不同于其中间区域,因此计算荔枝果壳孔隙率时,宜取果壳断面邻接内表面、邻接外表面、中间区域的

87  $\mu\text{m} \times 93 \mu\text{m}$  后,分别对果壳断面邻接内表面、邻接外表面区域、中间区域进行 5 组不同高度的孔隙面积测定,经数据处理及孔隙率均值的 SPSS 软件单因素方差分析,可得到荔枝红外干燥不同时刻果壳断面孔隙率的最小二乘均值及标准差,如表2所示。

表2 荔枝红外干燥不同时刻果壳断面孔隙率的最小二乘均值及标准差

Tab.2 Least square mean (LSM) and standard error (SE) for the shell cross-section porosity at different time during litchi infrared drying

干燥时刻	位置			
	邻接外表面	邻接内表面	中间区域	整体
$T_0$	0.359 $\pm$ 0.012 <sup>a</sup>	0.578 $\pm$ 0.017 <sup>a</sup>	0.611 $\pm$ 0.015 <sup>a</sup>	0.519 $\pm$ 0.007 <sup>a</sup>
$T_1$	0.413 $\pm$ 0.060 <sup>a</sup>	0.264 $\pm$ 0.035 <sup>c</sup>	0.466 $\pm$ 0.022 <sup>b</sup>	0.381 $\pm$ 0.014 <sup>b</sup>
$T_2$	0.177 $\pm$ 0.024 <sup>b</sup>	0.398 $\pm$ 0.046 <sup>b</sup>	0.255 $\pm$ 0.036 <sup>c</sup>	0.276 $\pm$ 0.028 <sup>c</sup>
$T_3$	0.094 $\pm$ 0.004 <sup>b</sup>	0.268 $\pm$ 0.034 <sup>c</sup>	0.191 $\pm$ 0.026 <sup>c</sup>	0.184 $\pm$ 0.013 <sup>d</sup>

注:同列不同字母表示平均值差异显著( $P < 0.05$ )。

由表 2 可知,随着红外干燥过程荔枝含水率下降,果壳断面试样的各区域孔隙率均值均呈波动下降,且各区域孔隙率均值存在不同时刻的显著性差异波动。其中邻接外表面、邻接内表面、中间区域的孔隙率均值在干燥  $T_1$ 、 $T_2$  时刻显著性差异波动较大,而整体孔隙率均值则存在不同时刻间组间差异显著性。

因以断面孔隙率表示果壳孔隙率可较好揭示荔枝果肉水分的跨层阻滞作用<sup>[5]</sup>,因此荔枝果壳孔隙率变化与其断面试样孔隙率变化趋势一致,随荔枝含水率降低而减小,由鲜果的  $0.519 \pm 0.007$  逐步降至  $0.381 \pm 0.014$ 、 $0.276 \pm 0.028$ 、 $0.184 \pm 0.013$ 。 $T_0$  时刻的果壳最小孔隙率与核桃果壳孔隙率值 0.48 较接近<sup>[11-12]</sup>。因其余  $T_1 \sim T_3$  时刻荔枝干燥过程的果壳孔隙率演变研究报道少,其红外干燥过程孔隙率变化目前仅能参考对比同为多孔介质的软粘土在固结力作用下的孔隙率变化数据。经对比,可知在  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  时刻荔枝红外干燥的果壳孔隙率均值与多孔介质软粘土在 0、100、800 kPa 固结力作用时的孔隙率 0.382、0.275、0.183 基本对应相等<sup>[12]</sup>。

除对多孔介质进行上述孔隙率研究外,研究者亦以小岛法测定孔隙截面边界的分形维数,考察多孔介质的孔隙特征<sup>[11-12]</sup>。多孔介质孔隙分形维数的小岛法测定公式为

$$\alpha_D(\varepsilon) = \frac{L^{\frac{1}{D}}(\varepsilon)}{A^{\frac{1}{2}}(\varepsilon)} \quad (2)$$

式中  $\alpha_D(\varepsilon)$ ——常数  $L$ ——孔隙周长,  $\mu\text{m}$   
 $\varepsilon$ ——绝对测量尺度与初始图形周长比  
 $D$ ——分形维数  $A$ ——孔隙面积,  $\mu\text{m}^2$   
 经处理,式(2)的简化式为

$$\lg L(\varepsilon) = B + \frac{D}{2} \lg A(\varepsilon) \quad (3)$$

基于式(2)~(3),本文应用 Image-Pro 软件对图 3 红外干燥  $T_0 \sim T_3$  各时刻的荔枝果壳断面孔隙率进行分形维数测定。测定时,先对荔枝红外干燥试验的  $T_0 \sim T_3$  各时刻果壳断面试样进行扫描电镜图片二值化处理,再改变框选区域面积,测量计算每个相应区域的孔隙面积与周长数据,经 Excel 软件处理,可得红外干燥不同时刻荔枝果壳断面孔隙分形维数变化,如图 4 所示。

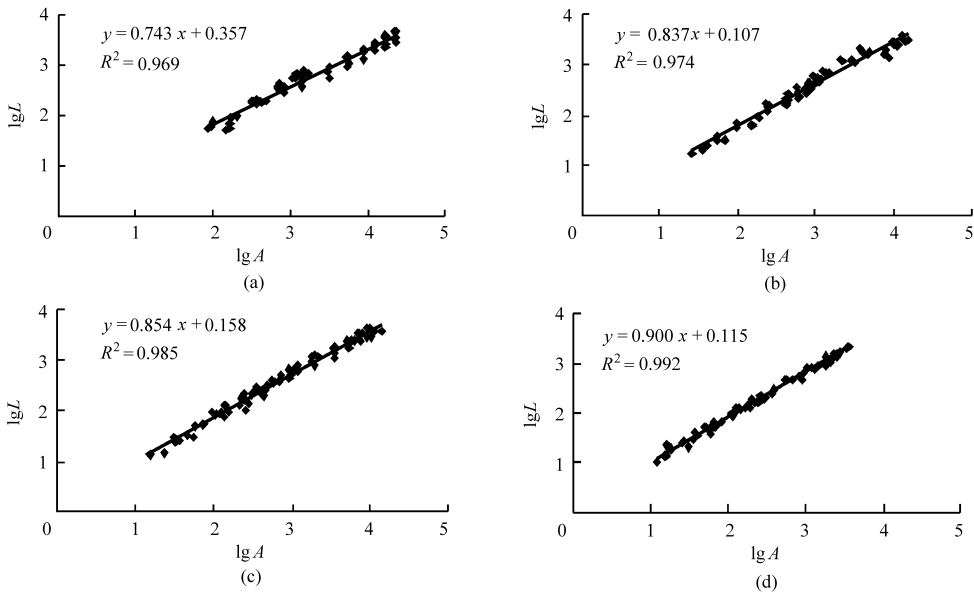


图 4 荔枝红外干燥过程果壳断面孔隙分形维数

Fig. 4 Pore fractal dimension of the shell cross section during infrared drying

(a)  $T_0$  (b)  $T_1$  (c)  $T_2$  (d)  $T_3$

由图 4 可知,荔枝红外干燥试验果壳断面孔隙分形维数随含水率降低而持续增大,果壳断面分形维数逐步由鲜果的 1.486 增至 1.674、1.708、1.800。在以上分析获得的荔枝红外干燥不同时刻果壳断面分形维数中, $T_0$  时刻的果壳断面分形维数与木材试样横截面的分形维数基本相同<sup>[11]</sup>,而荔枝红外干燥其余时刻的果壳分形维数亦因目前研究少,仅能参考比较多孔介质软粘土在 0~800kPa 固结力作用时

分形维数变化<sup>[10]</sup>。经比较,以上两种多孔介质的分形维数变化趋势较一致<sup>[10]</sup>。

基于荔枝果壳孔隙率与其断面孔隙率及分形维数间的相互关系<sup>[5,10]</sup>,本文用果壳断面分形维数表示果壳分形维数。通过对比荔枝干燥过程果壳孔隙率及其分形维数变化,可知荔枝果壳孔隙率与分形维数呈明显的相反趋势变化,该变化趋势亦与多孔介质软粘土在各级固结力作用下的相应值变化趋势

一致<sup>[10]</sup>,并与荔枝干燥失水速率的下降趋势相对应。受红外干燥的荔枝果壳孔隙水分快速散失,导致其孔隙结构紧缩,而结构致密孔隙率显著降低,大幅增加了果壳内部水分的跨层传输阻力,致使荔枝果壳内水分被滞留集聚,这不仅降低了荔枝干燥过程含水率的失水速率,而且也增大了荔枝果壳内腔的蒸气压力,造成荔枝干燥过程果体胀裂等品质劣

变现象。

### 2.3 红外干燥果壳表面色变过程

对荔枝红外干燥图2所示的6个重复试验果的果壳表面进行相对色差测定及分析,可得到荔枝红外干燥过程果壳表面的相对色差演变重复性比较图,如图5所示。

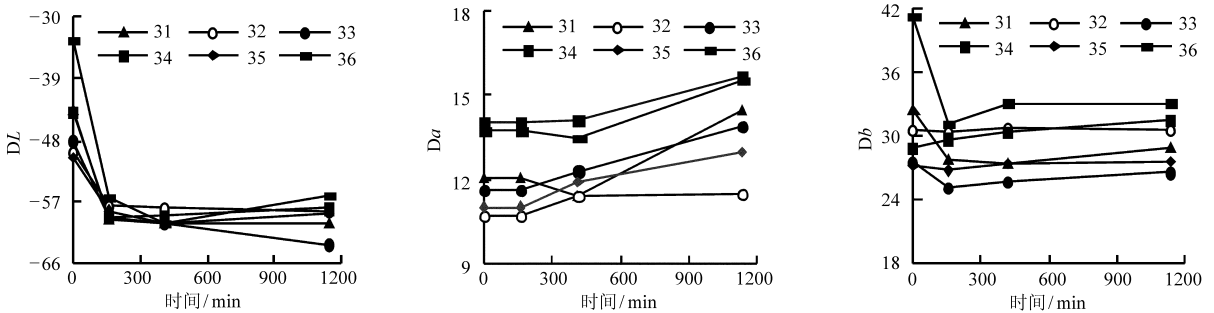


图5 荔枝红外干燥过程果壳表面相对色差演变过程重复性比较

Fig. 5 Comparison of relative color difference of the shell surface during infrared drying

由图5可知,荔枝红外干燥过程各果壳表面的相对色差变化不均,其色变过程与各果干燥过程的含水率变化速率相关。在初始干燥时,各果含水率变化速率大,相对色差变化明显,除Da值小幅波动外,DL、Db值均快速降低,在干燥后期,各果相对色差DL、Db值均小幅波动,但Da值略有增大。这可能与初始时段各果壳表面快速失水,引起较强烈的酶促褐变相关,在干燥后期,各果壳表面的酶类物质亦可能逐渐失去活性,其色变动力出现快速减弱,达到了基本稳定。由此可见,荔枝红外干燥,各果壳表面色变均匀性与其初始表面颜色有一定关联,并受干燥过程含水率的变化速率、酶促褐变动力影响,各果壳表面色变仍存在过程与局部个体的不均匀性差异,这与已有研究结果较吻合<sup>[4-5,17]</sup>。

综合以上试验结果可知,荔枝红外干燥含水率变化均匀性与结构、色变品质均与其初始状态、果壳孔隙结构的过程改变相关联,并较大地影响着各果红外干燥的性能与果干品质。缩小各果初始质量差异,可一定程度提升其干燥过程的均匀性,但综合改善荔枝红外干燥性能及果干品质,仍宜采用小质量果干燥,并将该干燥工艺与其他荔枝加工工艺结合,降低或消除果壳结构的阻滞作用,增强干燥动力,并抑制果壳表面干燥初始时的酶促褐变,提升各果干燥均匀性及果干品质,以期达到可切片果蔬的红外效果<sup>[3-4,7]</sup>,前期红外真空干燥工艺结果具有较好的参考作用<sup>[18]</sup>。

### 3 结论

(1) 荔枝红外干燥存在各果含水率过程变化不均,随干燥时间增加,含水率变化速率减小,且后期各果间差距加大。各果的初始质量影响荔枝含水率过程变化速率,初始质量较小果,其含水率变化速率较大,其含水率-时间指数函数最小二乘拟合系数 $A_M$ 、 $k_M$ 的绝对值均较质量较大果大。

(2) 荔枝红外干燥不同时刻果壳孔隙率均值随含水率下降而持续降低,由鲜果的0.519降至0.381、0.276、0.184,其分形维数则由鲜果的1.486升至1.674、1.708、1.800。不同时刻果壳孔隙率均值的组间差异显著。果壳孔隙率与分形维数间的相反变化与多孔介质软粘土固结力作用下的相应值变化趋势一致,并与荔枝含水率变化速率的下降趋势相对应。

(3) 荔枝红外干燥,果壳表面色变品质变化存在过程不均,在干燥初期,果壳表面相对色差除Da值小幅增加外,DL、Db值均快速减小,该变化与已有研究结果较吻合。

(4) 为综合提升荔枝红外干燥果干品质形成过程,宜缩小各果质量差距,进行小质量果干燥,并将荔枝红外干燥与其他深加工工艺相结合,降低或消除其果壳孔隙的阻滞作用,以增强干燥动力,抑制荔枝外观色变品质的快速转变,综合改善其干燥均匀性及果干品质。

## 参 考 文 献

- 1 蒋跃明,傅家瑞.荔枝果实采后生理及贮运保鲜技术研究进展(综述)[J].亚热带植物通讯,2000,29(3):64~70.  
Jiang Yueming, Fu Jiarui. A review of advances in the study of postharvest physiology and technology of storage and transport of litchi fruit[J]. Subtropical Plant Science, 2000, 29(3):64~70. (in Chinese)
- 2 赵华海,李长友,关植基.荔枝常压与减压干燥过程的试验研究[J].农业工程学报,1996,12(3):195~199.  
Zhao Huahai, Li Changyou, Guan Zhiji. Experiment and research on lychee drying under atmosphere and decompression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1996, 12(3):195~199. (in Chinese)
- 3 王相友,林喜娜.果蔬红外辐射干燥动力学的影响因素综述[J].农业机械学报,2009,40(10):114~120.  
Wang Xiangyou, Lin Xi'na. Influence factors of kinetics of infrared radiation drying for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10):114~120. (in Chinese)
- 4 林喜娜,王相友.苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J].农业机械学报,2010,41(6):128~132.  
Lin Xi'na, Wang Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):128~132. (in Chinese)
- 5 徐凤英,陈震,李长友,等.基于果壳孔隙测定的荔枝干燥仿真[J].农业机械学报,2013,44(11):190~194,207.  
Xu Fengying, Chen Zhen, Li Changyou, et al. Simulation of litchi drying based on its shell pore determination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):190~194,207. (in Chinese)
- 6 Xu F Y, Chen Z, Li C Y. A comparative study on numerical simulation in vacuum-fir radiation drying and oven drying of litchi fruit[C]//Proceedings of 17th International Drying Symposium (IDS 2010). Magdeburg, Germany, 2010:525~531.
- 7 Sharma G P, Verma R C, Pathare P B. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(3):361~366.
- 8 王海鸥,胡志超,屠康,等.微波施加方式对微波冷冻干燥均匀性的影响试验[J].农业机械学报,2011,42(5):131~135,170.  
Wang Haiou, Hu Zhichao, Tu Kang, et al. Effects on microwave vacuum freeze drying uniformity contributed by microwave loading methods[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):131~135,170. (in Chinese)
- 9 程志明,李影,王少峰.荔枝采后果皮褐变机理研究[J].福建农业学报,2005,20(增刊):77~79.  
Cheng Zhiming, Li Ying, Wang Shaofeng. The mechanism of postharvest browning of litchi pericarp[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2005, 20(Supp.):77~79. (in Chinese)
- 10 张季如,陶高梁,黄丽,等.表征孔隙孔径分布的岩土体孔隙率模型及其应用[J].科学通报,2010,55(27~28):2761~2770.  
Zhang J R, Tao G L, Huang L, et al. Porosity models for determining the pore-size distribution of rocks and soils and their applications[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(27~28):2761~2770. (in Chinese)
- 11 俞自涛,胡亚才,田甜,等.木材横纹有效导热系数的分形模型[J].浙江大学学报:工学版,2007,41(2):351~355.  
Yu Zitao, Hu Yacai, Tian Tian, et al. Fractal model for predicting effective thermal conductivity perpendicular to fibres of wood [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(2):351~355. (in Chinese)
- 12 王经洲,郑晓,宛农,等.基于扫描电镜图像分析的菜籽仁饼孔隙结构分形研究[J].农业工程学报,2008,24(3):16~20.  
Wang Jingzhou, Zheng Xiao, Wan Nong, et al. Fractal character of the pore structure of dehulled rapeseed cake based on scanning electron microscopy image analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3):16~20. (in Chinese)
- 13 Abdullah Çağlar, İnci Türk Toğrul, Hasan Toğrul. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2009, 87(4):292~300.
- 14 Shaeri Mohammad Reza, Beyhaghi Saman, Pillai Krishna M. On applying an external-flow driven mass transfer boundary condition to simulate drying from a pore-network model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(1):331~344.
- 15 Hedlund Jonas, Grahn Mattias, Korelskiy Danil, et al. Mass transport in porous media from first principles: an experimental and theoretical study[J]. Journal of Membrane Science, 2012, 415~416:271~277.
- 16 潘洵操,谢宝贵.荔枝果皮结构与果实贮藏性能关系的探讨[J].广西植物,1997,17(1):80~85.  
Pan Xuncao, Xie Baogui. Study on the relationship between the peel structure and storage quality of litchi fruits[J]. Guihaia, 1997, 17(1):80~85. (in Chinese)
- 17 武月红,白艳玲.干花制作过程中色变机理的研究[J].内蒙古农业科技,2010(6):53~54.  
Wu Yuehong, Bai Yanling. The mechanism of color change in dried flower production[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2010(6):53~54. (in Chinese)
- 18 徐凤英,李长友,陈震.荔枝在不同红外辐射源下真空干燥优化试验[J].农业机械学报,2009,40(4):147~150,106.  
Xu Fengying, Li Changyou, Chen Zhen. Optimization test of litchi vacuum drying under different infrared radiation sources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):147~150,106. (in Chinese)

## Temperature Field Homogeneity Control of Refrigerated Transport Carriage

Weng Weibing<sup>1</sup> Fang Dianjun<sup>2,3</sup> Li Qiang<sup>1</sup> Cao Miaolong<sup>1</sup> Wu Jian<sup>1</sup>

(1. Provincial Key Laboratory of Food Logistics Equipment & Technology,  
Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China

2. Department of Production Logistics, Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics,  
Dortmund 44227, Germany 3. CDHK, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Evaluating indicator for temperature distributions homogeneity was developed through optimization using orthogonal experiment. The influences of rotation speed of air refrigerating machine fan, porosity of flow equalization board and vertical space between frames on temperature distribution were analyzed. The simulation results show that the higher the fan rotation speed is, the better the temperature distribution homogeneity is, although the highest temperature in carriage is basically unchanged; the smaller the porosity is, the better temperature distribution homogeneity is; and the highest temperature in carriage is lowest when the porosity is 0.1; the smaller the frame vertical spacing is, the lower the highest temperature in carriage is and the better temperature distributions homogeneity is. For the “peak area” in temperature distribution, the carriage structure was new designed based on field-coordination principle and the temperature distributions homogeneity can be controlled by adjusting the gas curtain fan’s direction in right air-returning outlet.

**Key words:** Refrigerated transport carriage Temperature homogeneity control Orthogonal experiment

(上接第 227 页)

## Uniformity of Moisture Content, Shell Pore Fractal and Discoloration of Litchi during Infrared Drying

Xu Fengying Chen Zhen Li Changyou Liao Jianyuan

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,  
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** The uniformity dynamic of moisture content of litchi fruit during infrared drying was measured and fitting analyzed. Besides, the dynamic differences of the shell porosity and its fractal dimension of litchi during infrared drying were compared using Image-Pro and SPSS software. Furthermore, the change of the color of shell surface color of litchi during fractal dimension was also measured. The results show that the moisture content change of each litchi fruit is uneven during infrared drying. For relatively small litchi, the moisture content decreases quickly during initial drying; later on, the moisture content changes slowly, and during the last drying the difference among individual drying rates becomes significant. The fruit shell porosity significantly changes with the reduction of moisture content, and its mean value decreases from 0.519 to 0.381, to 0.276, and then to 0.184; but the fractal dimension of the pore increases from 1.486 to 1.674, to 1.708, and then to 1.800. The  $DL$  and  $Db$  values of shell surface color change significantly at the beginning, however, they change slowly during the following drying. Results from this study could provide a reference for the uniformity research of other multilayer-structure fruits and vegetables in infrared drying.

**Key words:** Litchi Shell Infrared drying Uniformity Pore fractal