doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.036

# 基于传热传质的荔枝预冷果温和质量损失率预测

郭嘉明[1,2]　魏鑫钰[1,2]　杜县南[1,2]　任俊杰[1,2]　李　慧[1,2]　吕恩利[1,2]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;
2.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642)

**摘要**:为掌握荔枝预冷过程传热传质规律,以果蔬气调保鲜试验平台为研究对象,依据热力学和水分迁移理论,建立了荔枝果实预冷过程传热传质数学模型,获得了果实在预冷过程中温度、质量损失率等参数的变化情况,分析了果实质量、初始温度对预冷时间、质量损失率变化的影响。经计算发现,同一堆放方式下,荔枝果实质量越大,果实失水速率越小;当荔枝果实质量为 10 kg 时,果实平均温度从 25℃降至 5℃约需 350 min,平均质量损失率为 2.16%;果实初始温度低,可以减缓果实质量损失率上升。经试验验证,计算结果与模拟结果吻合较好,对应时刻果实温度最大偏差为 2.8 K,平均相对误差为 13.1%;质量损失率计算值与试验值最大偏差小于 0.3%,平均相对误差为 10.7%。

**关键词**:荔枝;预冷;温度;传热传质;预测

**中图分类号**:S609$^+$.3;TS255.35　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)03-0323-07

# Prediction on Fruit Temperature and Weight Loss Rate for Litchi Pre-cooling Based on Heat and Mass Transfer

GUO Jiaming[1,2]　WEI Xinyu[1,2]　DU Xiannan[1,2]　REN Junjie[1,2]　LI Hui[1,2]　LÜ Enli[1,2]

(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

**Abstract**: Pre-cooling is one of the key measurements for litchi fruit preservation after being harvested, and the performance of pre-cooling has a great influence on the quality change of litchi fruit. In order to investigate the heat and mass transfer during the pre-cooling process, a mathematical model was built to describe the heat and mass transfer phenomenon in the test bed with controlled atmosphere for fruits and vegetables. The mathematical model was built based on the theory in heat dynamic mass transfer, and the temperature and moisture loss of the litchi fruit during pre-cooling process was calculated. The effects of fruit weight and initial temperature on the process were investigated. After that, some results can be made. The time of pre-cooling became longer as the weight of fruit was increased, however, the speed of moisture loss would be decreased. When there were 10 kg litchi fruits, it took about 350 min for the temperature of fruit decrease from 25℃ to 5℃ by the same stack method, and the weight loss rate was roughly 2.16% after pre-cooling. It can also be drawn that the speed of weight loss can be reduced by decreasing the initial temperature of litchi fruit. A test was done to verify the accuracy of the model, and the test results were matched well with the results from calculation, the maximum difference between them in fruit temperature and weight loss rate was 2.8 K and 0.3%, and the mean difference rate was 13.1% and 10.7%, respectively. The research results can be useful for the investigation of the heat and mass transfer mechanism in a cool room and can be used to predict the temperature and weight loss of fruits during pre-cooling process.

**Key words**: litchi; pre-cooling; temperature; heat and mass transfer; prediction

收稿日期:2018-10-11　修回日期:2018-12-02

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2018YFD0401305-2)、广东省科技计划项目(2017B020206005)和广东省教育厅"创新强校"工程项目(2016KZDXM028)

**作者简介**:郭嘉明(1987—),男,副教授,博士,主要从事果蔬冷链物流与装备研究,E-mail:jmguo@scau.edu.cn

**通信作者**:吕恩利(1979—),男,副教授,博士,主要从事冷链物流技术与装备研究,E-mail:enlilv@scau.edu.cn

## 0 引言

预冷是降低果品田间热、延长其保鲜期的重要措施之一[1-3]。果实温度以及质量损失率变化是判定预冷效果的一般标准。优化预冷过程以及对果实温度进行预测,可减少能耗并提高预冷效率。通过试验方式可以优化预冷过程。文献[4-5]研究了预冷风速对能耗和苹果温度变化的影响,指出较大风速可以促进果实降温。周慧娟等[6]研究了桃果长距离运输最适宜的预冷时间。试验研究具有真实、直观的特点,但耗费时间且成本较高。针对此,计算流体动力学(Computational fluid dynamic,CFD)方法在冷链设备的设计和优化中得到了应用。CHOURASIA 等[7-8]对马铃薯在冷库预冷过程中的温度和质量损失率进行了预测,并开展试验进行验证。文献[9-12]研究了包装形式和位置对包装箱内温度分布和果实温度变化的影响。对于较复杂的结构,数值模型往往需要巨大的网格数量,求解需要大量的计算时间,对计算机硬件要求较高[13]。

数学建模是研究冷链过程的重要方法之一,其具有成本低、计算时间短等优点。文献[14-17]分别对保鲜包装、电子配送箱、陈列柜和冷藏车厢的温度变化进行了预测。王娟等[18]基于集总参数法研究了风速对双孢蘑菇预冷过程的影响。李锦等[19]研究了冷藏车厢体的降温过程,并考虑了太阳辐射对制冷过程的影响,预测了车厢内温度变化情况。LAGUERRE 等[13]基于第三类热边界条件建立了冷库温降数学模型,针对冷库空气循环,对换热环节进行了研究,但并没有考虑蒸发器与空气之间的传热过程。

本文以已有果蔬气调保鲜试验平台为研究对象,考虑厢内外热交换、蒸发器与厢内空气热交换等过程,结合荔枝果实生理和物理特性,建立荔枝果实预冷过程传热传质数学模型,研究荔枝质量、初始温度对果实温度和质量损失率变化的影响,并进行试验验证。

## 1 研究对象

果蔬气调保鲜试验平台结构及荔枝果实的堆码形式如图 1 所示,图中 $T_1 \sim T_4$ 分别是风机出口空气温度、蒸发器出口空气温度、空气与货物进行热交换后温度和空气与厢体壁面换热后温度。厢体内空气在风机的驱动下,流经蒸发器,通过开孔隔板到达保鲜室,与货物和厢体维护结构进行热交换,并经回风道返回压力室,如此循环。厢体总尺寸(长×宽×高)为 1.90 m×1.10 m×1.50 m,维护结构内外表面材料为不锈钢,中间填充聚乙烯隔温材料,前者厚度 1 cm,后者厚度 8 cm。风机型号为 ZNF295-G,功率 0.20 kW;制冷机组功率 1.16 kW;蒸发器尺寸(长×宽×高)为 35.5 cm×20.2 cm×8.6 cm。采用尺寸(长×宽×高)为 42.5 cm×30.5 cm×12.0 cm 的塑料筐对荔枝果实进行装载。通过开启制冷机组和风机使空气降温,从而实现果实预冷。

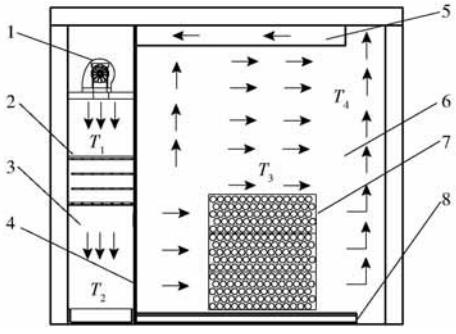


图 1 果蔬气调保鲜试验平台及模型结构

Fig. 1 Structure of test bed with controlled atmosphere and model

1. 风机 2. 蒸发器 3. 压力室 4. 开孔隔板 5. 回风道 6. 保鲜室 7. 荔枝 8. 气流导轨

## 2 热质交换模型

荔枝预冷传热传质模型主要包括空气与蒸发器、果实以及厢体维护结构等进行的热交换过程,热传递路径如图 1 所示。空气热平衡符合方程

$$Q_a = Q_f + Q_w + Q_p + Q_e \tag{1}$$

式中 $Q_a$——厢内空气获得热量,J

$Q_f$——空气与货物热交换所得热量,J

$Q_p$——空气与风机热交换所得热量,J

$Q_w$——空气与厢体维护结构热交换所得热量,J

$Q_e$——空气与蒸发器热交换所得热量,J

为简化模型,进行了部分假设:荔枝果实大小均匀,忽略表皮粗糙度对空气流动的影响;全部空气参与热质交换;忽略蒸发器结霜对换热过程的影响;假设荔枝货物体积、等效表面积与其质量成正比关系;荔枝质量损失率的变化主要由果实失水引起[13]。热物理性质如表 1[20-21]所示,其中,厢体壁面物理属性按照不锈钢和聚乙烯材料的组成比例计算。

**表 1 材料的热物理性质**

**Tab. 1 Thermal properties of litchi and air**

| 材料 | 密度/($kg \cdot m^{-3}$) | 比热容/($J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$) | 导热系数/($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 荔枝 | 932.89 | 3 710 | 0.51 |
| 厢体壁面 | 1 612 | 2 004.44 | 0.05 |
| 空气 | 1.225 | 1 006 | 0.022 5 |

### 2.1　空气与蒸发器热交换过程

空气在风机的驱动下，流经蒸发器，通过对流传热的形式与蒸发器进行热交换，该过程公式[13]为

$$k_e(T_e - T_a)\,\mathrm{d}S_e = m_a C_a \mathrm{d}T_a \tag{2}$$

令 $\theta_1 = \exp\left(-\frac{k_e S_e}{m_a C_a}\right)$，则

$$T_2 - T_e = \theta_1(T_1 - T_e) \tag{3}$$

式中　$k_e$——蒸发器传热系数，取 20.63 W/(m²·K)

$T_e$——蒸发器温度，取 268.15 K

$T_a$——空气温度，K

$S_e$——蒸发器传热面积，取 7.104 m²

$m_a$——空气流量，kg/s

$C_a$——空气等压比热容，J/(kg·K)

### 2.2　空气与货物热交换过程

经与蒸发器热交换后，空气的温度降低，通过开孔隔板到达保鲜室与荔枝货物进行热交换。热交换过程可表示为

$$k_f(T_f - T_a)\,\mathrm{d}S_f = m_a C_a \mathrm{d}T_a \tag{4}$$

令 $\theta_2 = \exp\left(-\frac{k_f S_f}{m_a C_a}\right)$，则

$$T_3 - T_f = \theta_2(T_2 - T_f) \tag{5}$$

式中　$k_f$——荔枝货物表面传热系数，W/(m²·K)

$S_f$——荔枝货物能够与空气进行热交换表面积，m²

$T_f$——荔枝果实温度，K

荔枝货物等效表面积计算公式为

$$a_p = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \tag{6}$$

式中　$a_p$——荔枝货物等效表面积，m²/m³

$\varepsilon$——荔枝货物的间隙率，取 0.3

$d_p$——等效直径，取 0.03 m

经过热交换后，荔枝货物温度变化表示为

$$\frac{\mathrm{d}T_f}{\mathrm{d}t} = \frac{q_f}{C_f} - \frac{m_a C_a (T_3 - T_2)}{m_f C_f} \tag{7}$$

其中　$q_f = 3.004\,9 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-8\,528.57}{T_f}\right)$　(8)

式中　$C_f$——荔枝货物综合等压比热容，J/(kg·K)

$q_f$——荔枝果实呼吸热，W/kg

$t$——降温时间，s

$m_f$——荔枝货物总质量，kg

荔枝果实呼吸速率与果实温度之间关系[22]为

$$R_{CO_2} = 1.99 \times 10^{14} \exp\left(\frac{-8\,528.57}{T_f}\right) \tag{9}$$

式中　$R_{CO_2}$——荔枝果实的呼吸速率，mL/(kg·h)

植物有氧呼吸反应式为[23]

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2\,816\ \mathrm{kJ} \tag{10}$$

### 2.3　空气与维护结构热交换过程

实际上，厢体维护结构的温度是非稳态的，由厢体内外空气共同作用决定。因此，本模型通过计算厢体维护结构传热特性，考虑厢体内外温度对荔枝预冷过程的影响。厢体维护结构与空气之间的热交换过程公式为

$$\frac{\lambda_w (T_o - T_a)\,\mathrm{d}S_w}{d_w} = m_a C_a \mathrm{d}T_a \tag{11}$$

令 $\theta_3 = \exp\left(-\frac{\lambda_w S_w}{m_a C_a d_w}\right)$，则

$$\theta_3 T_3 - T_4 = -(1-\theta_3) T_o \tag{12}$$

式中　$\lambda_w$——厢体壁面导热系数，W/(m·K)

$d_w$——厢体维护结构厚度，m

$S_w$——厢体维护结构内表面积，取 6.273 6 m²

$T_o$——厢体外空气温度，K

### 2.4　空气与风机热交换过程

风机运转将一部分电能转化为机械能，驱动空气流动；一部分转化为热能，使空气升温。为提高模型的计算精度，将风机与空气的换热过程添加到模型，该过程可表示为

$$m_a C_a \frac{T_1 - T_4}{\mathrm{d}t} = P(1 - k_d) \tag{13}$$

式中　$P$——风机功率，kW

$k_d$——电机机械效率，取 0.9

### 2.5　空气与货物传质过程

当空气中水蒸气分压低于果皮表面的水蒸气分压时，果皮中水分就会向外迁移，从而导致荔枝果实失水。因此，只要获得空气与果实表面的水蒸气分压差以及果皮的传质系数，就能求得荔枝果实在单位时间内的质量损失率。果皮表面的水蒸气分压一般为该温度下的饱和水蒸气压力，即假设荔枝果皮的水分活度接近 1.0。而空气从蒸发器出来后也达到了水蒸气饱和状态[13]。综上分析，荔枝果实的失水速率[24]可表示为

$$m_w = a_f k_m (p_{sf} - p_{s2}) \tag{14}$$

式中　$m_w$——失水速率，kg/s

$a_f$——荔枝果实综合表面积，m²

$k_m$——果实与空气传质系数，kg/(s·m²·Pa)

$p_{sf}$——果实表面饱和水蒸气压力，Pa

$p_{s2}$——蒸发器出口空气饱和水蒸气压力，Pa

不同温度下的饱和水蒸气压力[25]计算式为

$$\ln p_{sat} = A - \frac{B}{T_a + C} \tag{15}$$

式中　$p_{sat}$——饱和水蒸气压力，Pa

$A$、$B$、$C$——常数，分别取 16.37、3 676.66、−43.42

## 3 材料与方法

### 3.1 试验材料

试验材料为“妃子笑”荔枝,成熟度 90%,产自广州市增城区,于清晨采摘,运至华南农业大学,摘除枝条后,选取大小均匀果实用于试验。

### 3.2 果实传质系数获取试验

通过小型半导体制冷箱试验平台获取荔枝果实传质系数[24,26],平台结构如图 2 所示。该试验平台主要由半导体散热器组、风机、有机玻璃箱、数据采集仪、温湿度传感器等部分组成,箱体尺寸(长×宽×高)为 0.3 m×0.1 m×0.1 m,材料为有机玻璃,厚度为 3.6 mm,由制冷室、测量室、回风道组成,外覆 1 cm 厚保温棉,以减小外界对箱内环境的影响。在风机的作用下,气流从测量室经回风道到达制冷片,温度降低后回到测量室,实现降温。采用 testo425 型热线式风速仪(量程为 0 ~ 20 m/s,精度为 0.03 m/s + 5% 测量值)测量风速;采用温湿一体传感器对箱体内的环境进行监控;采用红外温度传感器对荔枝果实表面温度进行测量;采用单片机控制系统对温度进行控制;数据采集仪实时记录箱体内的温度和相对湿度变化。依次改变箱内风速为 0、0.20、0.50、0.86、1.14、1.40 m/s 进行试验,并记录试验时间。

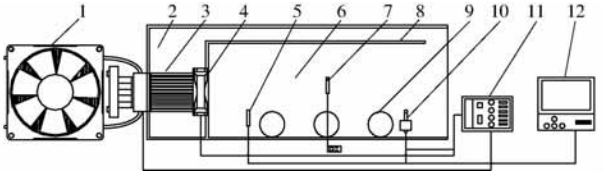


图 2 小型半导体制冷试验平台

Fig. 2 Small-scale test bed with semiconductor for cooling

1. 半导体散热器组 2. 制冷室 3. 半导体制冷片 4. 转子风机 5. PT100 型温度传感器 6. 测量室 7. 风速仪 8. 回风道 9. 荔枝样品 10. 温湿一体传感器 11. 单片机控制系统 12. 数据采集仪

采用圆片法获得荔枝果皮表面积,通过电子天平获得试验前后荔枝果实的质量差;通过式(15)求得荔枝果皮表面饱和水蒸气压力;结合式(14),得出综合传质系数表达式为

$$k_m = \frac{m_w}{a_f(p_{sf} - p_x)} \tag{16}$$

式中 $p_x$——测量室内空气水蒸气压力,Pa

### 3.3 预冷试验

预冷设备为华南农业大学自主研发的果蔬气调保鲜试验平台,货物及传感器布置如图 3 所示。挑选大小均匀的果实约 10 kg,并等分放置于 3 个塑料筐进行装载。采用 9 个 PT100 型温度传感器测量果实温度。选取 9 颗荔枝(每筐 3 个),插入 PT100 型温度传感器,均匀布置于荔枝货物区域。传感器读数通过连接数据采集仪进行实时记录。利用空调调节室温约为 25℃。荔枝果实试验前后质量采用电子天平进行测量。货物与传感器布置好后,关闭厢门,设置回风道风速为 10 m/s,控制温度为 3 ~ 5℃,开启制冷。为减小测量过程对荔枝果实以及厢内环境的影响,将电子天平放置于厢体内。每隔 1 h,操作人员进入厢体测量一次荔枝质量,全部操作 2 min 内完成。将风速仪探头放置塑料筐内测量筐内风速。取 5/6 预冷时间[27]作为预冷结束标准,因此,待荔枝果实平均温度降至约为 5℃时,停止预冷。荔枝果温取 9 个 PT100 型温度传感器读数的平均值,试验重复 3 次。

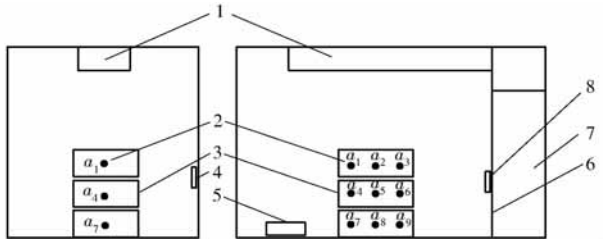


图 3 货物及传感器布置

Fig. 3 Location of products and sensors

1. 回风道 2. PT100 型温度传感器 3. 塑料筐 4. 中部控制传感器 5. 电子天平 6. 开孔隔板 7. 压力室 8. 隔板出口处控制传感器

### 3.4 模型求解与数据处理

对模型的参数进行整理,建立求解矩阵

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{T}_f}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{T}_a + \boldsymbol{B}\boldsymbol{q} \tag{17}$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{T}_w}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{T}_a \frac{\lambda_w S_w (T_o - T_3)}{m_a C_a d_w} \tag{18}$$

$$\boldsymbol{C}\boldsymbol{T}_a = \boldsymbol{D}\boldsymbol{T}_w + \boldsymbol{E} + \boldsymbol{F}\boldsymbol{T}_f + \boldsymbol{G}\boldsymbol{T}_e \tag{19}$$

其中

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{m_a C_a}{m_f C_f} & -\dfrac{m_a C_a}{m_f C_f} & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{T}_a = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{C_f} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{q} = [q_f] \tag{23}$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \theta_1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & \theta_2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 & -1 \\ mC_a & 0 & 0 & -mC_a \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}0\\0\\-(1-\theta_3)\\0\end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\P(1-k_d)\end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}0\\-(1-\theta_2)\\0\\0\end{bmatrix} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix}-(1-\theta_1)\\0\\0\\0\end{bmatrix} \tag{28}$$

利用 Matlab 软件对模型进行求解，待荔枝果温计算值达到 5℃，停止计算。采用平均相对误差和均方根百分比误差来评价试验结果与预测结果的差异[18]。

## 4　结果与分析

### 4.1　荔枝果实综合传质系数

通过试验，获得了不同风速下荔枝果实质量随时间的变化情况，通过线性拟合，得到荔枝果实综合传质系数与风速的关系

$$y=(2x+3)\times10^{-8}\quad(R^2=0.9105) \tag{29}$$

式中　$y$——荔枝果实综合传质系数，kg/(s·m²·Pa)

$x$——筐内平均风速，m/s

在预冷试验中，当回风道风速为 10 m/s 时，荔枝筐内的平均风速约为 0.10 m/s。因此，该模型荔枝果实综合传质系数取 $3.2\times10^{-8}$ kg/(s·m²·Pa)。

### 4.2　计算结果与试验验证

#### 4.2.1　果实温度

将模型求解结果与试验结果进行对比，结果如图 4 所示。荔枝果实温度从 25℃ 降至 5℃ 约需 350 min。荔枝果实温度计算结果变化趋势与试验结果较吻合，可以看出荔枝果实温度下降速度先快后慢，同一时刻最大偏差为 2.8 K，平均相对误差为 13.1%，均方根百分比误差为 16.4%。产生误差的原因可能是没有考虑温度、相对湿度等因素对空气比热容的影响。同时，由于荔枝具有果核，导致 PT100 型温度传感器在果实中的位置与中心位置具有一定的偏差。

#### 4.2.2　果实质量损失率

通过计算，获得了在预冷过程中荔枝果实质量损失率的变化情况，并与试验值进行对比，如图 5 所示。

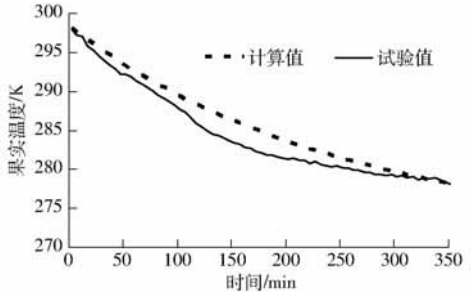


图 4　荔枝果实温度在预冷过程的变化

Fig. 4　Temperature variation of litchi fruit during cooling process

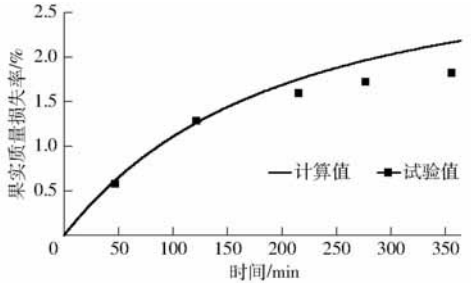


图 5　荔枝果实质量损失率在预冷过程中的变化

Fig. 5　Weight loss rate variation of litchi fruit during cooling process

从图 5 可以看出，荔枝果实质量损失率随预冷时间呈先快后慢上升。在预冷结束时，质量损失率约为 2.0%。通过对比，试验值与计算值变化规律一致，最大偏差小于 0.3%，平均相对误差为 10.7%，均方根百分比误差为 12.2%，证明了所建模型具有较高的准确性。

### 4.3　模型的实际应用

#### 4.3.1　荔枝质量对预冷过程的影响

图 6 是不同荔枝质量（10、20、30、40、50 kg）对预冷过程中果实温度变化的影响。从图中可以看出，荔枝果实温度从 25℃（298.15 K）降至 5℃（278.15 K），10、20、30、40 kg 果实所需的时间分别约为 350、710、1 020、1 340、1 705 min。

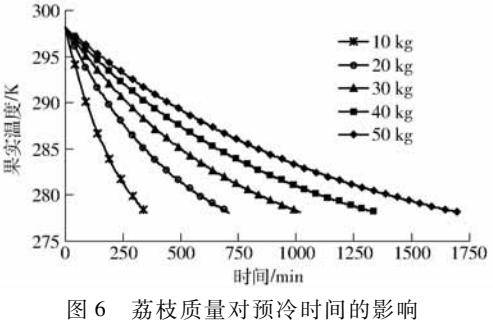


图 6　荔枝质量对预冷时间的影响

Fig. 6　Effects of weight of litchi on cooling time

图 7 是不同荔枝质量下，预冷过程中果实质量损失率的变化情况。从图中可以看出，虽然荔枝质

量小,预冷时间短,但其果实质量损失率上升速度也较大。这是由于当荔枝装载量较大时,空气和果实降温速度较慢,空气水蒸气饱和压力下降速度较慢,与果皮表面水蒸气饱和浓度之间的差值增大放缓,减缓了荔枝果实的失水。在预冷结束时,荔枝质量为 10、20、30、40、50 kg 对应的果实质量损失率分别达到了 2.16%、2.71%、3.20%、3.69%、4.19%。

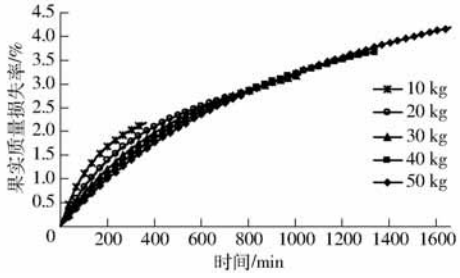


图 7 荔枝质量对果实质量损失率的影响

Fig. 7 Effects of weight of litchi on weight loss rate

### 4.3.2 初始温度对预冷过程的影响

图 8 是荔枝初始温度对果实降温过程的影响。从图中可以看出,降低荔枝果实的初始温度,有利于缩短预冷时间。当果肉温度为 30℃(303.15 K)、25℃(298.15 K)、20℃(293.15 K)、15℃(288.15 K)和 10℃(283.15 K)时,荔枝果实平均温度降至 5℃(278.15 K)所需时间分别约为 400、350、300、240、150 min。因此,若荔枝采后先经过快速预冷措施,如冰水预冷等,降至一定温度再进入冷库,可缩短荔枝的预冷时间,降低冷风机负荷。

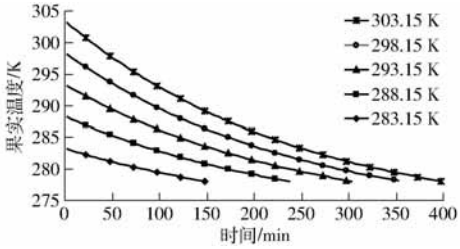


图 8 荔枝初始温度对预冷时间的影响

Fig. 8 Effects of initial temperature of litchi fruit on cooling time

图 9 是荔枝初始温度对果实质量损失率变化的影响。荔枝果实温度较低时,其果皮表面的水蒸气饱和压力较低,因此减小了与空气之间的水蒸气饱和压力差,果实失水速率较初始温度较高时小,失重速率呈先快后慢变化。当预冷结束时,预冷初始温度从高到低对应的果实质量损失率分别为 3.17%、2.17%、1.98%、0.92%、0.45%。

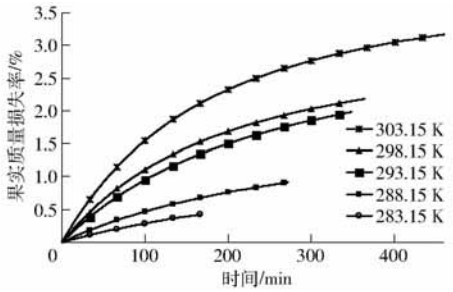


图 9 荔枝初始温度对果实质量损失率的影响

Fig. 9 Effects of initial temperature of litchi fruit on weight loss rate

## 5 结束语

基于果蔬气调保鲜试验平台,建立了荔枝果实预冷数学模型,考虑了果实直径、呼吸热对预冷过程的影响。通过试验获得了荔枝果实的综合传质系数,实现对荔枝果实预冷时间、质量损失率的变化进行预测,并开展试验进行验证。在预冷过程中荔枝果实温度计算值与试验值最大偏差为 2.8 K,平均相对误差 13.1%,均方根百分比误差为 16.4%;失重率计算值与试验值平均相对误差为 10.7%,均方根百分比误差为 12.2%。计算结果表明,同一堆放方式下,荔枝质量越大,预冷时间越长,但质量损失率上升速度减小。荔枝果实预冷初始温度较低,不但可以缩短冷库预冷时间,还可以减缓荔枝果实质量损失率的上升。

## 参 考 文 献

[1] CHERONO K, SIBOMANA M, WORKNEH T S. Effect of infield handling conditions and time to pre-cooling on the shelf-life and quality of tomatoes[J]. Brazilian Journal of Food Technology, 2018, 21: e2017016.

[2] 颜丽萍,刘升,饶先军. 预冷、冷藏运输和销售方法对青花菜品质的影响[J]. 食品与机械,2012,28(2): 174 - 176.
YAN Liping, LIU Sheng, RAO Xianjun. Effect of pre-cooling, low temperature transportation and retailing methods on quality of broccoli[J]. Food & Machinery, 2012, 28(2): 174 - 176. (in Chinese)

[3] 王伟锋. 番茄差压通风预冷理论分析及实验研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2013.
WANG Weifeng. Theoretical and experimental study on pressure precooling of tomato[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2013. (in Chinese)

[4] 刘斌,申江,邹同华,等. 果蔬预冷风速与风机能耗和预冷效果的实验研究及分析[J]. 制冷学报,2005,26(4): 17 - 19,24.
LIU Bin, SHEN Jiang, ZOU Tonghua, et al. Theoretical and experimental analyses of influences of pre-cooling air velocities on energy consumption of air fan and pre-cooling effects[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4): 17 - 19, 24. (in Chinese)

[5] 何晖,申江,管萍. 垂直通风差压球形果蔬预冷的数学模型[J]. 流体机械,2003,31(9): 46 - 49.
HE Hui, SHEN Jiang, GUAN Ping. Mathematical model of spherical fruit and vegetable during pressure pre-cooling for vertical ventilation[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(9): 46 - 49. (in Chinese)

[6] 周慧娟,叶正文,苏明申,等. 预冷与冷链运输和货架期间桃果热传导性能及品质差异[J]. 经济林研究,2013,31(3):116 – 120.
ZHOU Huijuan, YE Zhengwen, SU Mingshen, et al. Difference of peach heat conduction and quality during precooling, cold chain transportation and shelf periods[J]. Nonwood Forest Research, 2013, 31(3): 116 – 120. (in Chinese)

[7] CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, part 1: fluid flow and heat transfer[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 33 – 45.

[8] CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Three dimensional modeling on airflow, heat and mass transfer in partially impermeable enclosure containing agricultural produce during natural convective cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2136 – 2149.

[9] DELELE M A, NGCOBO M, GETAHUN S T, et al. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part Ⅱ: effect of package design[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86: 546 – 555.

[10] TUTAR M, ERDOGDU F, TOKA B. Computational modeling of airflow patterns and heat transfer prediction through stacked layers' products in a vented box during cooling[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 295 – 306.

[11] 王强,陈焕新,董德发,等. 黄金梨差压通风预冷数值分析与实验验证[J]. 农业工程学报,2008,24(8): 262 – 266.
WANG Qiang, CHEN Huanxin, DONG Defa, et al. Numeral analysis and experimental verification of pressure pre-cooling of golden pears[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 262 – 266. (in Chinese)

[12] FERRUA M J, SINGH R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part Ⅱ: experimental validation of the flow model[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 349 – 358.

[13] LAGUERRE O, DURET S, HOANG H M, et al. Simplified heat transfer modeling in a cold room filled with food products [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 149: 78 – 86.

[14] JALALI A, SEIIEDLOU S, LINKE M, et al. A comprehensive simulation program for modified atmosphere and humidity packaging (MAHP) of fresh fruits and vegetables[J]. Journal of Food Engineering, 2017,206:88 – 97.

[15] LAGUERRE O, FLICK D. Temperature prediction in domestic refrigerators: deterministic and stochastic approaches[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(1): 41 – 51.

[16] LAGUERRE O, HOANG M H, FLICK D. Heat transfer modeling in a refrigerated display cabinet: the influence of operating conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2012,108:353 – 364.

[17] HOANG H M, LAGUERRE O, MOUREH J, et al. Heat transfer modelling in a ventilated cavity loaded with food product: application to a refrigerated vehicle[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 389 – 398.

[18] 王娟,谭金翠,王相友. 风速对双孢蘑菇预冷过程的影响[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10): 203 – 208.
WANG Juan, TAN Jincui, WANG Xiangyou. Effect of air velocity on pre-cooling process of agaricus bisporus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 203 – 208. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20131033&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.033. (in Chinese)

[19] 李锦,谢如鹤,刘广海,等. 冷藏车降温数学模型建立与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6): 175 – 182.
LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Establishment of cooling mathematical model and analysis of influence factors for refrigerated trucks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 175 – 182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130630&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.030. (in Chinese)

[20] Fluent, Inc. FLUENT 6.1 user's guide[M]. Lebanon, NH: Fluent, Inc., 2003.

[21] 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州:华南农业大学,2006.
XU Fengying. Study on mechanism heat and mass transfer in litchi vacuum & IR combined drying[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)

[22] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 盒装荔枝果实降温特性数值分析与验证[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5):218 – 224.
GUO Jiaming, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Numerical analysis and verification on characteristics of temperature decreasing of litchi fruits with packages[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):218 – 224. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160530&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.030. (in Chinese)

[23] SONG Y, VORSA N, YAM K L. Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53(2): 103 – 109.

[24] LE PAGE J F, CHEVARIN C, KONDJOYAN A, et al. Development of an approximate empirical-CFD model estimating coupled heat and water transfers of stacked food products placed in airflow[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(2): 208 – 216.

[25] 刘晖,张洪涛,肖红. 水饱和蒸汽压的 Antoine 方程常数的比较[J]. 内蒙古石油化工,2009(13): 32 – 34.

[26] KOCA R W, HELLICKSON M L, CHEN P M. Mass transfer from 'd' Anjou' pears in CA storage[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1993, 36(3): 821 – 826.

[27] DELELE M A, NGCOBO M, GETAHUN S T, et al. Studying airflow and heat transfer characteristics of a horticultural produce packaging system using a 3-D CFD model. Part I: model development and validation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86:536 – 545.