苹果气调贮藏湿环境影响因素的研究

文改黎，　南晓红*

（西安建筑科技大学 环境与市政工程学院，陕西 西安 710055）

摘要：以某苹果气调贮藏技术研究中心的 1# 气调库为研究对象，采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型建立了苹果气调库内气体流动、传热与传质的三维数学求解模型。研究了冷风机送风速度、送风温度和加湿装置对库内湿环境的影响。结果表明：送风温度对库内相对湿度有显著的影响，随着送风温度的降低，库内相对湿度明显增大；增大送风速度，气调库湿度梯度变小，货物区内湿度变大；在没有任何加湿装置时，气体区的湿度梯度明显大于货物区，库内大部分区域相对湿度为 85%~90%，达不到苹果气调贮藏适宜的湿环境。综合考虑苹果气调贮藏适宜的湿环境，对于该气调库，在送风温度 273 K，送风速度为 5 m/s，采用加湿装置对库内加湿时，可以明显改善其湿环境，这对降低苹果干耗损失有重要意义。

关键词：气调贮藏；湿环境；呼吸速率；相对湿度

中图分类号：TB 611　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673—1689(2015)12—1278—07

Study on the Storage Humidity in Controlled Atmosphere Storage of Apple

WEN Gaili，　*NAN Xiaohong*

（School of Environment and Municipal Engineering，Xi'an University of Architecture and Technology，Xi'an 710055，China）

Abstract：A three dimensional physical and mathematical model of flow，heat and mass transfer in atmosphere-controlled storage rooms inside the Apple Controlled Atmosphere （CA） Storage Technology Research Center No.1 was established in this paper using k-ε turbulence model. The effect of air cooler's supply air velocity，supply air temperature and humidifying device on the storage humidity was investigated. There was a significant impact of supply air temperature on the relative humidity （RH） of CA storage room，which notably increased with the decrease of supply air temperature. The humidity gradient decreased while the RH of cargo area increased if the supply air velocity increased. A higher humidity gradient was observed in the gas zone compared with that of the cargo area without any humidifying device. The RH of the gas zone was mostly around 85% ~90% which was not suitable for Apple CA storage. It was suggested that the supply air temperature should be adjusted to 273 K and the supply air velocity was 5 m/s for apple CA storage. The humidifying device could improve the RH in storage room and reduced the weight loss.

Keywords：controlled atmosphere storage，storage humidity，respiration rate，relative humidity

收稿日期：2014-10-27

基金项目：国家“十二五”科技支撑计划项目(2008BAJ08B07-1)。

* **通信作者**：南晓红(1976—)，女，陕西西安人，工学博士，教授，主要从事通风制冷及空调工程研究。E-mail：manxh@xauat.edu.cn

中国各地果蔬品种、栽培及采收情况的差异，造成了果蔬采后生理生化特点的不同，其对气调贮藏环境的适应性和最适贮藏条件也各不相同，缺乏有针对性的贮藏环境参数已成为制约气调技术在全国推广的重要因素。而果蔬贮藏质量，对温度反应最为敏感，其次是气体组分和湿度。在贮藏初期，较高的相对湿度，能够延长果品的后熟时间；而到了后期，主要作用是防止果肉的水分蒸发[1]。从实践情况看，当温度和气体组分控制稳定后，湿度则显得尤为重要，特别是储藏 6 个月以后，湿度对水果质量的影响更为显著。影响库房相对湿度的因素有温度、库内压力、冷风机是否工作、冷风机的蒸发温度、风量、风速及库房内的温度梯度等。当这些因素发生变化，就会引起库内相对湿度发生波动，而偏移了最佳的气调贮藏条件，则引起货物区与气体区水蒸气压力差的增大，使水果中的水蒸气向气体区迁移，发生了干耗。据资料统计，气调贮藏的干耗为5%~10%，普通冷藏的干耗率为 15%~20%[2]。因此，研究气调库湿环境的影响因素，对优化制冷系统设计和运行具有重要意义。

CFD 技术在计算流场等方面被证明是一种有效的工具[3-9]。王志华等人研究了黄金梨气调贮藏中 CO_2 浓度对果实组织褐变及品质的影响，最后得出了黄金梨适宜的气调贮藏条件，PPO 活性和乙醇含量是黄金梨果心褐变的重要影响因子[10]；Delele 和 Schenk 等人利用 CFD 工具对一个贮藏菊茵根的高温冷藏库内气体流场进行数值模拟，通过改变加湿系统喷嘴的数量，以及加湿时间的长短，提出了最佳的加湿设计方案和设计参数，充分显示了 CFD 的独特优势[11]；胡浩等人建立了水果气调库内传热与传质的三维动态模型，对一个贮藏苹果的小型气调库内降温、降氧过程中温度和氧组分浓度变化过程进行了数值模拟，但最后的计算没有作进一步的验证研究，对湿环境也尚未研究[12]；季阿敏对果蔬的气调贮藏降温过程进行了数值计算，实验结果与编程计算结果吻合较好，模拟温度与实验温度的差值在 2 ℃ 以内，不足之处是没有考虑传质的存在[13]。

公开发表的研究主要集中在气调库速度场、浓度场和温度场[14-17]，却对相对湿度场少有研究，而湿环境也是影响水果贮藏品质的一个重要因素。相对湿度对果蔬贮藏的影响，主要表现在增强或减弱果蔬的蒸发作用，在气调贮藏中，贮藏环境中的相对湿度与制冷装置的配置有很大关系，按冷藏配置的制冷装置，大多满足不了气调贮藏对相对湿度的要求，要保持较高的相对湿度，一般都应采取加湿措施[18]。本课题以陕西省苹果气调贮藏技术研究中心的 50 t 气调库为研究对象，采用了 $k-\varepsilon$ 紊流模型和较成熟的 Simple 算法[19]，对库内气流组织和相对湿度场进行数值模拟，并用实验验证模拟结果；又进一步研究了冷风机送风速度、送风温度和加湿装置对库内湿环境的影响。

1 数学计算模型

本课题研究对象气调库库容量为 50 t，容积为 8 m×4.6 m×6.5 m，隔热层采用 120 mm 的聚苯乙烯泡沫塑料。吊顶式冷风机体积 1.6 m×0.5 m×0.5 m，风机距离两侧墙面均为 1.5 m，回风口距墙面 0.5 m。货物堆放体积为 6 m×3.6 m×5.5 m，货物堆距两侧墙面为 0.5 m，距冷风机送风口墙面为 0.5 m。计算模型见图 1。

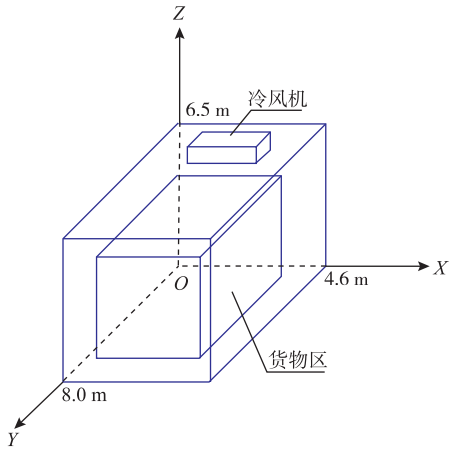


图 1　气调库计算模型

Fig. 1　Computational model of CA storage

1.1 气体区数学模型

按气调库实际情况，建立库内气体区物理模型：

1）气调库内气体为牛顿流体；

2）气体在流动过程中是不可压缩的；

3）气体物性参数为常数；

4）忽略由于围护结构气密性而引起的热质损失。

选择 $k-\varepsilon$ 紊流模型，在直角坐标系下，气调库内流场可用下列微分方程表示：

$$\mathrm{div}(\rho u\phi)=\mathrm{div}(\Gamma_\phi \mathrm{grad}\ \phi)+S_\phi \qquad (1)$$

式(1)中：ϕ，Γ_ϕ，S_ϕ 分别是通用变量、广义扩散系数和广义源项。对应于不同的通用变量，式(1)中各项

参数的具体表达式可参见文献[10]，其中对于气体区，能量方程和组分浓度方程中的源项为0；$k-\varepsilon$ 模型中经验常数采用经典推荐值，见文献[9]。

1.2 货物区数学模型

气调贮藏要求货物采取高堆满装方式，这样使库内气体空间相对较小，货物区所占空间大；针对堆放的球形水果，可将货物区看作多孔介质，将水果当作固体颗粒，间隙中的气体对应于多孔介质中的流体。

1.2.1 呼吸速率模型 呼吸速率又称呼吸强度，是衡量呼吸强弱的定量指标。它是指单位质量的植物组织或器官，在一定环境条件下单位时间内所释放二氧化碳或吸收氧的数量。果蔬的呼吸过程可由下式表示[20]：

$$C_6H_{12}O_6+6O_2\Rightarrow 6CO_2+6H_2O+2\ 822\ kJ$$

本文采用了 Lee 等人提出的基于酶动力学原理的 Michaelis-Menten 型呼吸速率模型[21]，当将 CO_2 看作 O_2 的非竞争性抑制剂时，呼吸速率方程为

$$r_i=\frac{V_m[O_2]}{K_m+(1+[CO_2]/K_i)[O_2]} \tag{2}$$

式(2)中：r_i 为呼吸速率(O_2 消耗，CO_2 生成)，mL /(kg·h)；V_m 为最大呼吸速率，mL /(kg·h)；$[O_2]$,$[CO_2]$为 O_2 和 CO_2 体积分数，%；K_m 为 Michaelis 常数，%；K_i 为抑制系数，%。其中 O_2 的 V_m=13.7 mL /(kg·h)，K_m=3.45%；CO_2 的 V_m=13.2 mL /(kg·h)，K_m=3.25%[9]。

1.2.2 能量方程 当多孔介质相互紧密接触且不移动，多孔材料温度不太高，无相变，且其空隙中的流体处于静止或流动甚微时，多孔材料内的传热过程是由固体与流体的微观粒子运动而引起的热量传递即导热模式控制，假设：

1) 流体在各处均可近似视为处于局部平衡状态，这一假设在流速较低时适宜；

2)流体的流动服从 Darcy 定律（即流量与流动驱动力呈线性关系）；

3)流体物性参数为常量；

4)忽略多孔介质中的热辐射，这一假设在温度不太高时适宜。

货物区的能量传递方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial T}{\partial z}\right)+S=0 \tag{3}$$

扩散系数 $$\Gamma=\lambda_e\rho_g/\eta \tag{4}$$

式(3)(4)中：λ_e 为货物区的当量导热系数；S 为苹果呼吸热所产生的源项。

$$S=[\rho_s\rho_g(1-\zeta)Q_r]/\eta \tag{5}$$

$$\eta=\zeta(C_p\rho)_g+(1-\zeta)(C_p\rho)_s \tag{6}$$

式(5)(6)中：Q_r 为呼吸热；下标 g，s 分别代表气体、固体；ζ 表示多孔介质的孔隙率。

货物区能量方程的源项，主要由苹果的呼吸热引起，根据文献[9]，呼吸热 Q_r 可由所获得的果蔬呼吸速率模型得到。

$$Q_r=\frac{2\ 822}{6\times22.4\times10^3}\cdot\frac{r_{O_2}+r_{CO_2}}{2}\eta \tag{7}$$

式(7)中，η 表示呼吸能量转换成热量的转换系数，一般认为呼吸能量转换为热量的部分约为 55%[20]。

1.2.3 对流-扩散方程 为简化模型，用 FLUENT 软件进行模拟计算时选用组分输运模型，不考虑空间内部散湿壁面上的水滴汽化和水蒸气凝结[13]。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial C}{\partial z}\right)+S=\frac{\partial(\rho_i C)}{\partial t} \tag{8}$$

式(8)中：ρ_i 为多孔介质中的质量扩散系数，S 为果蔬的呼吸作用所引起的源项，其中

$$\Gamma=\rho_i D' \tag{9}$$

式(9)中，D'为气体组分的密度，为多孔介质内部径向和轴向的混合扩散系数。

果蔬呼吸时要消耗氧气，产生二氧化碳和水蒸气，根据文献[9]，可确定源项

$$S=\frac{(1-\zeta)\rho_s r_i M_i}{3\ 600\ \zeta} \tag{10}$$

式(10)中：ρ_s 为果蔬堆的平均密度，kg/m^3；ζ 为多孔介质的孔隙率，取 ζ= 0.5[22]；r_i 为以氧气消耗率(二氧化碳生成率) 表示的果蔬的呼吸速率，mL /(kg·h)；M_i 为气体组分的摩尔质量，kg/mol。

1.3 边界条件

在求解以上流动控制方程时，冷风机出风口风速、温度、氧气和二氧化碳组分浓度值按测试结果赋值（冷风机出风口处设有加湿器），进口紊流强度按进口气流运动动能的 5%设定。冷风机回风口为“outflow”，对所有壁面边界，速度按无滑移条件处理，温度按冷库壁温或环境温度取值。

2 计算模型的实验验证

为了验证数值模拟计算的正确性，做了验证实验，在苹果贮藏过程中一个月内测试了气调库内的温度、O_2 和 CO_2 体积分数。采用的试验仪器有：奥氏气体分析仪和 GAC 电脑自动分析控制系统。GAC 电脑自动分析控制系统用于测量气调库内的 O_2、

CO_2 体积分数及温度,它由采样分析系统 O_2 分析仪、CO_2 分析仪、PLC 编程器主板、显示屏及键盘等组成。每个库体通过电磁阀依次和分析采样泵相连,测出 O_2 和 CO_2 体积分数采样值并发送至 O_2 和 CO_2 分析仪。测点布置在 1# 气调库内的 X = 2.3 m, Y = 2.3 m, Z = 3 m。选取了 6 个体积分数区间,测点温度测试结果如图 2 所示,可以看到,在 CO_2 体积分数(3%)不变的前提下,随着氧气体积分数的增大,苹果呼吸作用受到的抑制减弱,库内温度会有所升高。试验与理论计算结果基本吻合,说明研究中建立的数值计算模型是正确的。

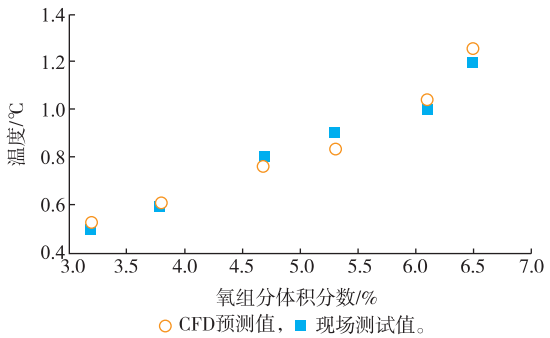


图 2 气调库内温度随 O_2 体积分数的变化规律

Fig. 2 Variation of temperature with O_2 concentration in CA storage

3 结果分析

选取的 1# 库内,在冷风机出风口处装有 CJS-1000 型工业加湿器,将水雾化并使之充满和悬浮于整个贮藏空间,提高库内的相对湿度,有效地防止苹果在贮藏中水分损失,保持新鲜度。在计算中,将加湿器简化为一个面散湿源,散湿量为 0.54 kg/h,进行数值求解计算。图 3 和图 4 为 O_2 体积分数 3.2%、CO_2 体积分数 3%时,不同截面处气调库内的相对湿度场(相对湿度单位:×100%),其中图 3 库内有加湿器,图 4 库内无加湿措施。

3.1 送风速度对库内湿环境的影响

图 3 为冷风机不同送风速度时,X=2.3 m 截面处气调库内相对湿度场的分布情况,从图可知,随着送风速度的增大,货物区内的相对湿度有增大的趋势,但并不是送风速度越大越好。当风速为 6 m/s 时,货物区的相对湿度普遍比气体区的高,这样就会产生水蒸气分压力差,货物区的水蒸气会向气体区迁移,水果的水分会有所散失,干耗就严重,从而极大地影响食品的品质。此外,随着风速的增大,传热和传质的作用增强,水果呼吸作用也随之增强,从而产热和产生的水蒸气量增多,因而不利于水果的贮藏。

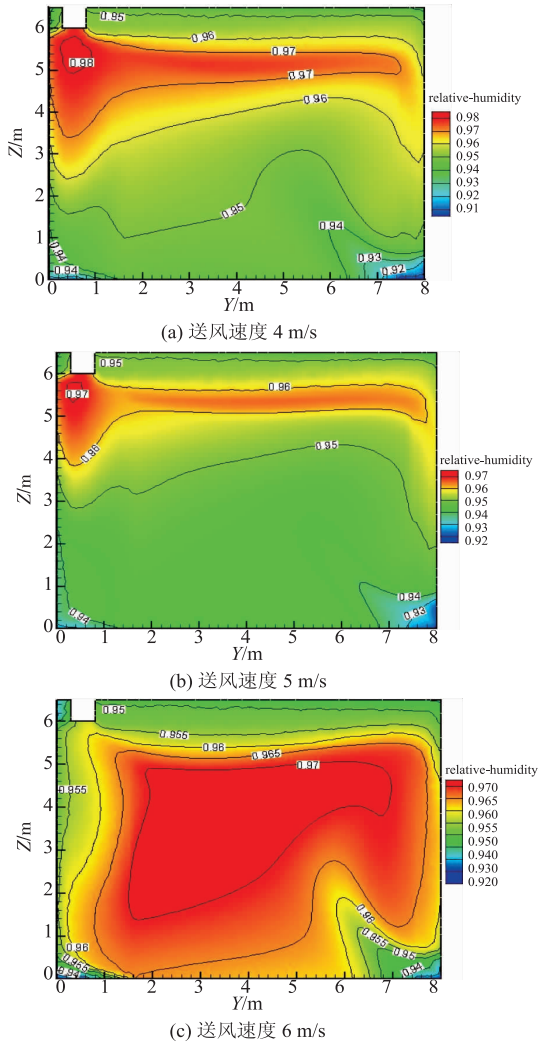
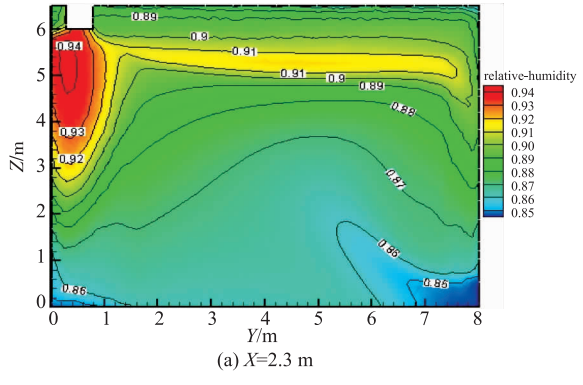
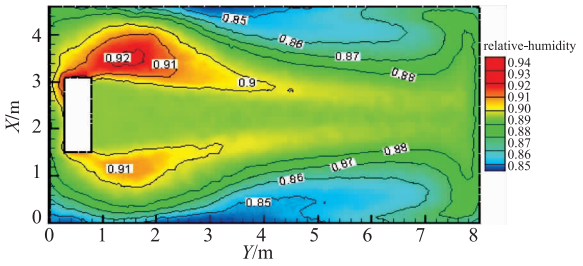


图 3 不同送风速度时库内的相对湿度场

Fig. 3 Relative humidity field of different supply air velocity in CA storage





(b) Z=6.25 m

图 4　不同截面处气调库内的相对湿度场

Fig. 4　Relative humidity field at different sections in CA storage

图 5 为根据模拟结果得到的冷风机送风速度分别为 4、5 m/s 和 6 m/s 时,库内相对湿度随高度方向的变化曲线。从图可见,送风速度为 5 m/s 时,库内的相对湿度小于对应高度上风速为 4 m/s 时的相对湿度,湿度梯度也小,湿度场均匀性好;而当风速为 6 m/s 时,虽然湿度梯度很小,相对湿度分布均匀,但从图 3(c)可知,货物区相对湿度高于气体区,不利于水果的贮藏,再综合考虑苹果气调贮藏要求的相对湿度,取最佳送风速度为 5 m/s。

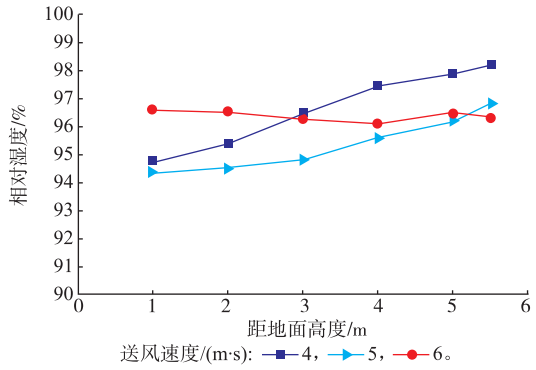


图 5　送风速度对库内相对湿度的影响

Fig. 5　Effect of supply air velocity on the efficiency of relative humidity in CA storage

3.2　送风温度对库内湿环境的影响

图 6 为送风速度 5 m/s，根据模拟结果得到的冷风机送风温度分别为 272.5、273、274 K 和 275 K 时,库内相对湿度随高度方向的变化曲线。从图可见,送风温度对库内相对湿度有显著的影响,随着送风温度的降低,库内相对湿度明显增大,这是由于库内温度降低,引起水蒸气饱和分压降低,从而使库内相对湿度增大。当送风温度为 272.5 K 时,库内气体区的相对湿度基本达到 99%左右,在相对湿度较高时,会腐蚀果皮,产生裂口,外观形象不好。当送风温度为 274 K 和 275 K 时,库内气体区的相对湿度低于 90%,在长期的贮藏中,若库内气体的相对湿度偏低,就会使水果的水分蒸发增强,引起干耗,缩短水果的贮藏保鲜期和降低水果的食用和商品价值。气调库内相对湿度的增大,主要是因降温引起的,综合实际情况和经济性考虑,该气调库送风温度取为 273 K。

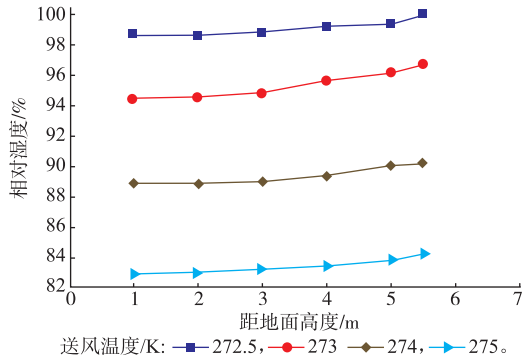


图 6　送风温度对库内相对湿度的影响

Fig. 6　Effect of supply air temperature on the efficiency of relative humidity in CA storage

3.3　加湿装置对库内湿环境的影响

见上图 4,在没有进行机械加湿,冷风机送风速度为 5 m/s,送风温度为 273 K 时,不同截面处气调库内的相对湿度场分布。从图 4(a)和图 3(b) 中可以看出,冷风机出风口附近处相对湿度较大,随着贴附射流的衰弱，远离出风口的区域相对湿度减小,而回风口处相对湿度达到最大,这是由于新鲜水果中含有大量的水分，可近似认为质量分数 100%[18],水分子蒸气压一般达到饱和,高于气体区的蒸气压。这样,水蒸气从货物区向气体区迁移,最终导致冷风机回风口附近相对湿度升高。苹果内水分向气体区的散失,导致了苹果的干耗,贮藏品质下降。同时也可以看到,在没有任何加湿手段时,库内只有局部区域的相对湿度达到 90%以上,大部分区域为 85%~90%，达不到苹果气调贮藏适宜的湿环境。在贮藏中,水果水分的蒸发是不可避免的,但是可以通过调节贮藏环境的相对湿度来控制水果水分的蒸发。在冷风机出风口附近安装加湿器后,库内的相对湿度基本可以达到 95%,缩小了货物区和气体区之间的水蒸气分压差,从而减少了水果水分的蒸发,保持贮藏环境的相对湿度相对稳定。

图 7 为加湿器对库内相对湿度影响的曲线变

化图,可见,在未采取任何加湿手段时,气体区的湿度梯度明显高于货物区,这是由于气体区主要是强迫对流换热,热质交换作用强;而货物区主要以扩散为主,不如对流作用对传质的影响大。

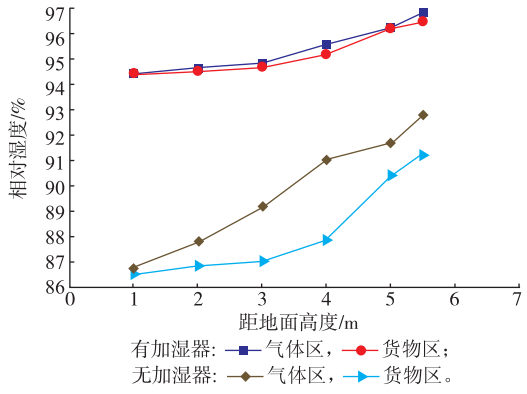


图 7　加湿器对库内相对湿度的影响

Fig. 7　Effect of humidifying device on the efficiency of relative humidity in CA storage

在距地面 4 m 高度处，相对湿度显著升高,这是由于靠近冷风机出风口附近的气体区,对流传质作用明显强于货物区内部，水蒸气迁移速度快,相对湿度变化大。同时也可以看到,用加湿器对库内进行加湿时,整个库内的相对湿度变化均匀,气体区和货物区的相对湿度基本一样,大大改善了库内的湿环境,缩小了货物区和气体区的水蒸气分压力,从而降低了干耗。

4 结　语

本课题以某苹果气调贮藏技术研究中心的 1# 气调库为研究对象，建立了气调库内气体流动、传热与传质的三维数学求解数值模型,并对模型的有效性进行了实验验证。结果表明,数学模型能比较真实地反映苹果在贮藏过程中的实际情况,冷风机送风温度对气调库内湿环境有显著的影响作用,增大送风速度,气调库湿度梯度变小,货物区内湿度变大,但并不是送风速度越大越好。在气调贮藏中,没有任何加湿措施时,气体区的湿度梯度明显大于货物区,不利于水果的贮藏,而利用加湿器对库内进行加湿可以明显改善其湿环境。对于该苹果气调库,当采用加湿器进行加湿,冷风机送风速度为 5 m/s,送风温度为 273 K 时，可以使库内湿度场均匀,达到适宜苹果贮藏的湿环境。

参考文献:

[1] 宗凯. 谈果品气调冷库之重要参数——湿度[J]. 冷藏技术,2001(3):69-70.
ZONG Kai. The discussion of humidity in fruit atmosphere's important parameters [J]. **Refrigeration Technology**,2001(3):69-70. (in Chinese)

[2] 黄敏. 水果的气调保鲜技术[J]. 中国科技信息,2010,24:74-75.
HUANG Min. The technology of atmosphere on fruit [J]. **China Science and Technology Information**,2010,24:74-75. (in Chinese)

[3] Chourasia M K,Goswami T K. Steady state CFD modeling of airflow,heat transfer and moisture loss in a commercial potato cold store[J]. **International Journal of Refrigeration**,2007,67(4):672-689.

[4] James S J,James C,Evans J A. Modeling of food transportation systems a review [J]. **International Journal of Refrigeration**,2007,29(6):947-957.

[5] Wang Huajun,Qi Chengying,Du Hongpu. Peak phenomenon of temperature and humidity during high temperature heat storage in soil[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**,2011,32(4):490-495.

[6] 王华军,路俊超,杨宾,等. 双热源作用下土壤高温热湿迁移数值模拟[J]. 太阳能学报,2013,34(11):1910-1915.
WANG Huajun,LU Junchao,YANG Bin,et al. Simulation of high-temperature heat and moisture migration in soil with double heat sources[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**,2013,34(11):1910-1915. (in Chinese)

[7] 徐俊,蒲亮,厉彦忠,等. 人工环境室内湿度场的数值模拟和优化[J]. 西安交通大学学报,2007,41(1):77-81.
XU Jun,PU Liang,LI Yanzhong,et al. Numerical simulation and optimization of humidity field in artificially environmental chamber[J]. **Jouranl of Xi'an Jiaotong University**,2007,41(1):77-81. (in Chinese)

[8] 南晓红,何媛,刘立军. 冷库门空气幕性能的影响因素[J]. 农业工程学报,2011,27(10):334-338.
NAN Xiaohong,HE Yuan,LIU Lijun. Numerical investigation on the performance of an air curtain of a cold store and its impact

factors[J]. **Transaotions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2011,27(10):334-338.(in Chinese)

[9] 刘颖. 果蔬快速降氧气调贮藏环境的热动力学研究[D]. 上海:上海交通大学,2004.

[10] 王志华,丁丹丹,王文辉,等. 黄金梨气调贮藏中对果实组织褐变及品质的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(7):114-118.
WANG Zhihua,DING Dandan,WANG Wenhui,et al. Effects of different CO_2 volumefraction on fruit browning and quality of 'Whangkeumbae' during controlled atmosphere storage [J]. **Ansactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, 2010,41(7):114-118. (in Chinese)

[11] Delele M A,Schenkect A,Ramon H. Evaluation of a chicory root colds tore humidification System using computational fluid dynamics[J]. **Journal of Food Engineering**,2009,94:110-122.

[12] 胡浩,袁秀玲,孙大伟,等. 水果气调贮藏中温度、氧组分浓度变化过程的三维动态模拟及实验研究[J]. 制冷学报,1998(1):28-34.
HU Hao,YUAN Xiuling,SUN Dawei,et al. Three dimensional dynamic simulation and experiment investigation about temperature and oxygen density variation process of the fruit C. A. storage [J]. **Journal of Refrigeration**,2009,94:110-122. (in Chinese)

[13] 季阿敏. 果蔬气调贮藏冷却阶段温度变化的数值模拟及验 证[J]. 农业工程学报,2006,22(5):24-27.
JI Amin. Numerical simulation and experimental verification of temperature variation tluring controlled atomosphere cold storage of fruits and vegetables [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2006,22 (5):24-27. (in Chinese)

[14] Kan A K,Han H D. Study on temperature field distribution inside reefer containers[J]. **International Conference on Cryogenics and Refrigeration Proceedings**,2008:884-887.

[15] Wang H,Touger S. Distributed dynamic modeling of a refrigeratedroom [J]. **Internationaljournalof Refrigeration**,1990,13: 214-222.

[16] Xie J,Qu X H,Shi J Y,et al. Effect of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation[J]. **Journal of Food Engineering**,2006,77(2):355-363.

[17] 缪晨,谢晶. 冷库空气幕流场的非稳态数值模拟及验证[J]. 农业工程学报,2013,29(7):246-253.
MIAO Chen,XIE Jing. Unsteady state numerical simulation and verification of flow field of air curtain in cold stores [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2013,29(7):246-253. (in Chinese)

[18] 张祉祐,杜玉宽,袁秀玲,等. 气调贮藏和气调库—水果保鲜新技术[M]. 北京:机械工业出版社,1994:37-50.

[19] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2005.

[20] 赵家禄,黄清华. 小型果蔬气调库[M]. 北京:科学出版社,2000.

[21] Lee D S,Hoggar P E,Hoggar J. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzymekinetics[J]. **Journal of Food Science**,1991,56(5):1580-1595.

[22] 吴天,谢晶. 果品冷藏库气体流场模拟及实验研究[J]. 流体机械,2006,34(6):9-14.
WU Tian,XIE Jing. Experimental research & simulation on fluid fields of the cold store [J]. **Lluid Machinery**,2006,34 (6): 9-14. (in Chinese)