

# 荷兰黄瓜外部水分迁移模型及实验研究

张婷玉,陶乐仁\*,蔡梅艳,范国华

(上海理工大学低温与生物研究所,上海 200093)

**摘要:**综合单向扩散、双膜理论以及有效膜模型等原理,提出了荷兰黄瓜在贮藏前期的外部水分迁移传质模型——类单向扩散过程,通过实验导出了荷兰黄瓜在恒温恒湿条件下水分迁移时的有效膜厚度 $\Delta x$ ,避免了理论分析过程中存在的有效膜厚度难以确定等问题,为预测果蔬前期水分损失提供了一个新的思路。

**关键词:**荷兰黄瓜,外部水分迁移,类单向扩散,有效膜厚度

## Model and experiment of external moisture transfer of Dutch cucumber

ZHANG Ting-yu, TAO Le-ren\*, CAI Mei-yan, FAN Guo-hua

(Institute of Refrigeration & Cryogenics, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on one-way diffusion, double membrane theory and effective membrane model, the external moisture transfer models of Dutch cucumber in the beginning of storage was built, which was called analogous diffusion in one-way direction. Then the effective film thickness was derived through experiment on water evaporation strength of Dutch cucumber under the condition of constant temperature and humidity, which avoided problem that it was difficult to determine thickness of effective film during analyzing its moisture transfer process, and provided a new thought for forecasting the water loss of fruits and vegetables in the beginning of storage.

**Key words:** Dutch cucumber; external moisture transfer; analogous diffusion in One-way direction; thickness of effective film

中图分类号:TS255.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2013)06-0167-03

果蔬与我们的生活密不可分,但其容易失水萎蔫,从而使其经济价值降低,甚至失去可食用性,造成巨大的资源浪费<sup>[1-2]</sup>。因而,分析果蔬的水分传质过程<sup>[3]</sup>,阐释果蔬的失水机理,是非常有必要的<sup>[4-5]</sup>。目前,果蔬的传质研究还比较少<sup>[6-7]</sup>,并且大多是分析真空<sup>[8]</sup>、超声波<sup>[9]</sup>等方法对果蔬水分迁移过程的影响,而恒温恒湿条件下的果蔬水分迁移过程则是少有涉及。恒温恒湿条件很难精细控制,而且果蔬水分迁移也是一个复杂的过程,果蔬表面与周围空气之间的水分蒸汽压差是其外部水分传递的推动力<sup>[10]</sup>。本文主要对果蔬在不同温湿度条件下的外部水分迁移过程进行了研究。荷兰黄瓜外部形状规则,含水量极高,持续失水能力较强,具有水果蔬菜的双重特性,是理想的实验对象。通过对荷兰黄瓜外部水分迁移过程的分析,以期预测荷兰黄瓜前期水分损失提供一个思路,对分析其他柱状果蔬贮藏前期的外部水分迁移过程起到一定的借鉴作用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

荷兰黄瓜 购于上海杨浦易初莲花连锁超市,选择鲜嫩、无病害、无明显机械损伤、大小基本一致、

初始含水量为96%~98%的荷兰黄瓜作为实验材料;变色硅胶 上海新火硅胶厂。

DFY-5/20型低温恒温反应槽 上海丞明仪器设备有限公司;Sartorius BP3100S型电子分析天平(0.01g) 德国赛多利斯集团;TH23PRO型智能温度湿度记录仪 杭州微松环境科技有限公司;数据采集模块5018 研华科技股份有限公司;T型热电偶 探针直径1mm,测温精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 实验条件

本实验选择在温度为 $5^\circ\text{C}$ (空气流速很小,可忽略不计)、常压以及不同相对湿度(40%、80%、99%)条件下进行,其他实验条件保持一致。

### 1.3 实验方法

1.3.1 荷兰黄瓜外部水分迁移传质模型的建立 在贮藏前期,荷兰黄瓜含水量很高,为96%~98%,可认为其内部水分迁移速率大于外部水分迁移速率,因而在这一阶段外部水分迁移速率是荷兰黄瓜水分迁移的限制因素。据此,在考察荷兰黄瓜的外部水分迁移情况时,可将整个荷兰黄瓜看作一个充满水的圆柱形水柱,与周围的空气进行类单向扩散。

就其外部水分迁移而言,由于荷兰黄瓜表面水分的蒸发,水蒸气不断向周围扩散,而周围有极低流速的气流不断将水蒸气带走,同时,扩散于周围空气中的水分又被预先放置的干燥剂(变色硅胶)吸收,以维持整个动态的恒温恒湿系统,从而建立起一个

收稿日期:2012-10-10 \* 通讯联系人

作者简介:张婷玉(1989-),女,硕士研究生,研究方向:果蔬保鲜与贮藏。

稳态的类单向扩散过程。依据双膜理论<sup>[1]</sup>,在类单向扩散过程中,水蒸气向周围扩散,其传质阻力来源于荷兰黄瓜与周围空气间的一层虚拟膜层,可称这一虚拟薄层为有效膜。

由此,可作以下假设:荷兰黄瓜为充满水的圆柱形水柱;扩散的过程是稳态的;有效膜各向同性;有效膜各处厚度一致;系统一直是恒温恒湿的;系统总压力 $P_0$ 为常数;混合气体可作为理想气体处理。荷兰黄瓜物理模型简图及实验布点如图1所示。

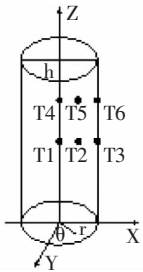


图1 荷兰黄瓜物理模型简图及实验布点

Fig.1 The physical model diagram of Dutch cucumber and the measure point of the experiment

由于假设中有效膜各向同性,现任取某一面积微元 $ds$ 进行类单向扩散分析。荷兰黄瓜有效膜两侧的压力关系模型如图2所示。面积微元 $ds$ 的下方可看作无限深的水,有效膜内测水蒸气的压力 $P_{w1}$ 可看作实验温度下的饱和蒸汽压,而其外侧水蒸气的压力 $P_w$ 可通过系统相对湿度 $RH$ 与 $P_{w1}$ 建立联系,两者之间的压力差 $P_w$ 等同于单向扩散中水蒸气的绝对压力差。通过上述的合理推广,荷兰黄瓜外部水分迁移过程可看作变型的单向扩散过程,采用类似单向扩散的计算方法,利用质量通量密度公式即可求出有效膜厚度。

$$M_w = \frac{D_T P_0}{R_w T} \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{P_0 - P_{w1}(RH)}{P_0 - P_{w1}} \quad \text{式(1)}$$

式中: $M_w$ —水蒸气的质量通量密度,  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $D_T$ —水蒸气在空气中的质扩散率,  $m^2/s$ ;  $P_0$ —系统总压力,  $Pa$ ;  $R_w$ —水蒸气的理想气体常数,  $m^2/(s^2 \cdot K)$ ;  $T$ —系统温度,  $K$ ;  $\Delta x$ —有效膜厚度,  $m$ ;  $P_{w1}$ —有效膜内侧水蒸气的饱和蒸汽压,  $Pa$ ;  $RH$ —系统空气相对湿度, %。

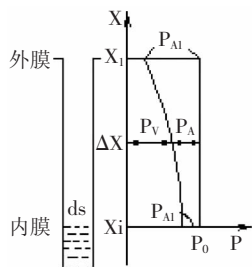


图2 荷兰黄瓜有效膜两侧的压力关系

Fig.2 The pressure relationship of effective film on both sides of Dutch cucumber

根据荷兰黄瓜外部水分迁移传质模型的建立过程,将各传感器植入设置的各实验测点,其实物图如

图3所示。



图3 实验系统及荷兰黄瓜各测点布置

Fig.3 The experiment system and the measure point of Dutch cucumber

1.3.2 荷兰黄瓜比表面积测定 选择鲜嫩、无病害、无明显机械损伤、大小基本一致(含水量为96%~98%)的荷兰黄瓜作为实验材料,使之在各个质量区间均具有代表性。用电子分析天平称量其质量( $g$ ),利用Motic Images Advanced 3.0软件计算出各条荷兰黄瓜的表面积( $m^2$ ),依照比表面积计算公式,进而求出荷兰黄瓜的比表面积( $m^2/kg$ )。其计算公式为:

$$\text{比表面积} (m^2/kg) = \frac{\text{表面积}}{\text{质量}} \quad \text{式(2)}$$

1.3.3 荷兰黄瓜失水速率的测定 荷兰黄瓜属于非呼吸跃变型果蔬类,呼吸作用造成的质量损失相对于失水来说可以忽略不计,而且随着贮藏温度的降低这种损失将会更少,而单位面积的失水速率是指果蔬在单位面积单位时间内的失水量,它可以表征荷兰黄瓜在该条件下的失水能力,其计算公式为:

$$R = \frac{m_0 - m}{S \Delta t} \quad \text{式(3)}$$

式中: $R$ —荷兰黄瓜的失水速率,  $g/(m^2 \cdot h)$ ;  $m_0$ —荷兰黄瓜标记为0时刻的质量,  $g$ ;  $m$ —荷兰黄瓜实验中某时刻的质量,  $g$ ;  $S$ —荷兰黄瓜的外表面积,  $m^2$ ;  $\Delta t$ —荷兰黄瓜实验中的时间间隔,  $h$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 荷兰黄瓜的比表面积与质量的关系

通过对12根市售荷兰黄瓜的质量及其表面积的测量,表明荷兰黄瓜的质量与其比表面积存在线性的关系,其关系图如图4所示。

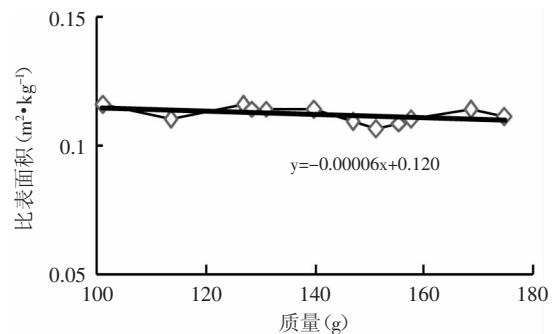


图4 荷兰黄瓜的比表面积与其质量的关系

Fig.4 The relationship between the specific surface area and mass of Dutch cucumber

由图4可知,荷兰黄瓜的比表面积随其质量增加而呈现总体逐渐减小的趋势,即质量越大,单位质量

的表面积越小。由于市售荷兰黄瓜的质量均在120~160g范围内,彼此间的比表面积变化量很小的,仅为 $0.0024\text{m}^2/\text{kg}$ ,平均标准偏差为0.29%,因而荷兰黄瓜的比表面积可看作定值,为 $0.112\text{m}^2/\text{kg}$ 。由以上分析可知,荷兰黄瓜的比表面积与质量的相关度不大,即荷兰黄瓜的初始质量对本实验影响不大。

## 2.2 荷兰黄瓜的失水速率的确定

单位面积失水速率表征了果蔬的失水能力,图5反映了5℃下相对湿度对荷兰黄瓜失水过程中质量变化的影响。

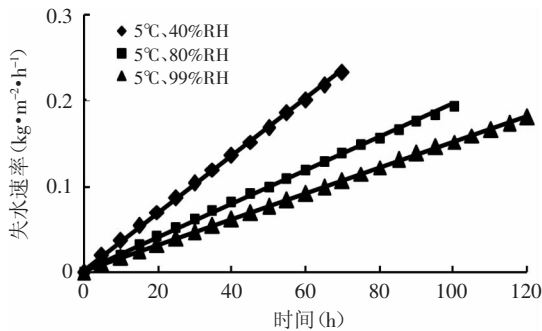


图5 荷兰黄瓜的单位面积失水速率

Fig.5 The water loss rate of Dutch cucumber under unit area

在3d内,40%、80%和99%相对湿度条件下,单位面积失水速率( $y$ )与贮藏时间( $x$ )对应的关系式分别为 $y=0.003x$ , $R^2=0.999$ ;  $y=0.002x$ , $R^2=0.999$ ;  $y=0.001x$ , $R^2=0.999$ 。由此可知,荷兰黄瓜的单位面积失水速率与贮藏时间呈线性关系,表明在此期间荷兰黄瓜的内部水分迁移速率始终大于外部水分迁移速率。

## 2.3 质扩散系数DT的确定

质扩散系数是个物性参数,表征物质扩散能力的大小,取决于混合物的性质、压力与温度,主要靠实验确定。对气相物质而言,在已知温度 $T_0$ 、压力 $P_0$ 下的扩散系数 $D_0$ 时,可由式(4)估计温度 $T$ 、压力 $P$ 下的质扩散系数 $D_1$ 。

$$D_1 = D_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1.5} \frac{P_0}{P} \quad \text{式(4)}$$

式中, $T_0$ 、 $T$ 为温度, $T_0=25^\circ\text{C}$ ;  $P_0$ 、 $P$ 为空气压力, $P_0=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ;  $D_0$ 、 $D_1$ 为水蒸气在空气中的质扩散系数, $D_0=0.256 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 。

利用公式(2)可得出其他条件下的质扩散系数。在5℃、 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ 大气压力下,水蒸气在空气中的质扩散系数 $DT=0.229 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 。本实验的水蒸气质扩散系数均可以 $DT=0.229 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 代入计算。

## 2.4 有效膜厚度 $\Delta x$ 的确定

通过实验分析得到了荷兰黄瓜在5℃不同相对湿度下的单位面积失水率,结合外部水分迁移模型,由式(1)即可求出本模型中的有效膜厚度 $\Delta x$ ,通过计算得到:

RH=40%时, $P_{w1}=349.24$ , $\Delta x=3.97 \times 10^{-3} \text{m}$ ; RH=80%时, $P_{w1}=698.48$ , $\Delta x=4.51 \times 10^{-3} \text{m}$ ; RH=99%时, $P_{w1}=864.37$ , $\Delta x=3.73 \times 10^{-3} \text{m}$ 。

864.37,  $\Delta x=3.73 \times 10^{-3} \text{m}$ 。

在预测荷兰黄瓜贮藏前期水分损失时,可采用两种方法进行计算——取平均值或线性值。对于相对湿度波动较大的情况时宜采用平均值法,而相对湿度波动较小时宜采用线性法。

## 3 结论与展望

3.1 自主搭建的实验台,能够控制好温度和相对湿度稳定性,保证了荷兰黄瓜主要进行分子传质,对流传质过程可忽略。通过控制干燥剂的暴露率对系统相对湿度进行人工控制,能很好地达到要求,避免了当前相对湿度自动控制波动大的缺点。

3.2 在贮藏前期,外部水分迁移速率为限制性因素时,荷兰黄瓜的有效膜厚度 $\Delta x$ 可取其平均值或线性值带入计算,为预测荷兰黄瓜前期水分损失提供了一个新的思路。

3.3 本文中质扩散系数 $DT$ 是依照估计公式确定的,肯定存在一定的误差。质扩散系数与系统中混合物的压力与温度相关,可能与相对湿度也有一定关系,期望对该系统中的质扩散系数进行测定,或许有效膜厚度 $\Delta x$ 能得到进一步优化。

## 参考文献

- [1] 丁建武,兰盛,张华昌. 减少粮食产后损失对确保我国粮食安全的重要性[J]. 粮食储藏,2005(2):49-50.
- [2] 刘兴华,寇莉. 果菜瓜贮藏保鲜[M]. 北京:中国农业出版社,2000:14-21.
- [3] 王艳红. 新鲜果蔬低温贮藏失水机理研究[D]. 天津:天津商业大学,2010.
- [4] Araya Ahromrit, Prabhat K Nema. Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro[J]. Journal of Food Science and Technology, 2010, 47(6):632-637.
- [5] 苗玉涛,邹同华,黄健. 单体球形果蔬压差预冷过程的简化数学模型及其实验验证[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(2): 164-167.
- [6] Raval AH, Solanki SC, Rajvir Yadav. A simplified heat transfer model for predicting temperature change inside food package kept in cold room[J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48(5):62-67.
- [7] 金仁喜, 淮秀兰. 多孔介质高强度传热传质的理论研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26:152-154.
- [8] 金听祥, 张海川, 李改莲, 等. 熟肉真空冷却过程中水分迁移理论分析和实验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8):309-312.
- [9] 赵芳, 陈振乾, 施明恒. 胡萝卜超声波预干燥热湿耦合迁移过程的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):349-354.
- [10] 夏文水. 食品工艺学[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007: 32-43.
- [11] 夏雅君. 工程传质学[M]. 北京:机械工业出版社, 1985: 107-135.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 540-550.