

# 自然气调包装对采后苹果蒸腾作用的影响

郭彦峰, 王大威, 侯秦瑞, 刘伟, 张伟

(西安理工大学, 西安 710048)

**摘要:** 基于自然气调包装设计了一种包装箱, 通过对比实验, 研究了自然气调包装对采后苹果蒸腾作用的影响规律, 建立了自然气调包装苹果的蒸腾作用模型和参数。实验结果和数值分析表明, 采用瓦楞纸箱和聚酯镀铝薄膜的自然气调包装技术, 可使得采后苹果的蒸腾速率逐渐减小, 最后趋于平衡, 而且当自然气调包装内环境的相对湿度大于 90% 时, 采后苹果的蒸腾作用可得到较大程度的抑制。

**关键词:** 自然气调包装; 蒸腾作用; 苹果

**中图分类号:** TB485.2; TS206.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)15-0001-04

## Effect of Modified Atmosphere Packaging on Transpiration of Postharvest Apple

GUO Yan-feng, WANG Da-wei, HOU Qin-rui, LIU Wei, ZHANG Wei

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A packaging carton based on modified atmosphere packaging (MAP) technology was put forward and designed. The influencing rule of MAP on transpiration of postharvest apples was studied by comparison experiments, and the mathematical model and its parameters of the transpiration of postharvest apples in MAP system were established. The experimental result and numerical analysis showed that the MAP with corrugated box and the PET/Al film can inhibit transpiration and reduces transpiration rate, and reach the equilibrium of water vapor. Moreover the transpiration of post-harvest can better restrained while the relative humidity within in MAP system is higher than 90%.

**Key words:** modified atmosphere packaging; transpiration; apple

由于采后果品仍然不断地进行蒸腾、呼吸等生理活动, 蒸腾作用是采后果品的主要失水途径, 其保鲜贮藏包装理论与技术研究工作得到了广泛关注<sup>[1-4]</sup>。国内外学者的研究成果表明, 自然气调包装技术是一种有效的采后果品保鲜贮藏技术, 它利用选择性透气薄膜包装密封采后果品, 可调节维持包装系统内部的氧气、二氧化碳气体环境, 抑制采后果品的呼吸消耗, 从而达到保鲜效果<sup>[5-8]</sup>。廖启忠、杜振杰等人<sup>[9-10]</sup>研究了 BOPP, PE 铝箔复合材料的阻隔性能, Rafael, Mangaraj 等人<sup>[11-12]</sup>认为 PVDC, PET, PP, PE 是 4 类重要的气调包装技术用薄膜。鲁玉妙、高华等人<sup>[13-14]</sup>深入研究了“粉红女士”苹果成熟采收时和常

温贮藏后各种指标的变化, 以及这种果品在低温冷藏与室温贮藏中果实的乙烯释放速率、内源乙烯浓度及果实品质的变化。笔者探索采后苹果的非冷库、非气调库的保鲜方法, 研究自然气调包装技术对采后苹果蒸腾作用的影响, 分析自然气调包装苹果的蒸腾作用模型和参数。

## 1 实验方案与材料

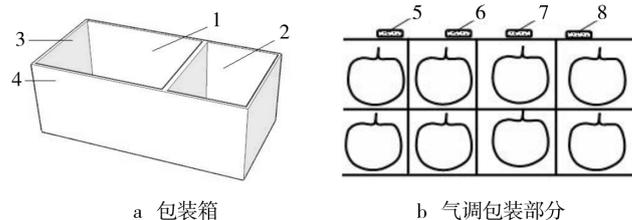
自然气调包装是一种利用塑料薄膜对气体的选择透过性来延长果品贮藏期的保鲜技术, 应用于采后苹果的贮藏包装, 可有效抑制其呼吸、蒸腾作用, 提高

**收稿日期:** 2011-04-19

**基金项目:** 西安市科技局科技计划项目(NC08018)

**作者简介:** 郭彦峰(1970—), 男, 陕西长安人, 博士, 西安理工大学教授, 主要从事运输包装防护、果品保鲜贮藏的理论与技术研究。

保鲜效果。基于自然气调包装原理,提出并设计了一种用于对比实验研究自然气调包装对蒸腾作用的影响规律的包装箱,见图1。它是一种瓦楞纸板套袋



1—气调包装部分;2—未包装部分;3—薄膜;4—纸箱;5—O<sub>2</sub>吸收剂包装袋;6—CO<sub>2</sub>吸收剂包装袋;7—乙烯吸收剂包装袋;8—水分吸收剂包装袋

图1 实验包装箱

Fig. 1 Packaging box for experiment

箱,外箱采用C型单瓦楞纸板,内箱采用BC型双瓦楞纸板。内箱分为气调包装、未包装包装2个部分,2个部分之间用瓦楞隔板胶带固定分开,未包装包装部分是普通纸箱。气调包装部分是在普通纸箱内表面涂有一层蓄冷剂胶体的涂布层,在涂布层上均匀撒有蓄冷剂粉末层,在蓄冷剂粉末层的内表面设置有一层18 μm厚的聚酯镀铝薄膜(属于选择性透过薄膜)。在内箱的气调包装部分装好苹果之后,可同时使用氧气吸收剂、二氧化碳吸收剂、乙烯吸收剂、水分吸收剂,气调包装部分应处于密封状态。蓄冷剂吸收苹果因呼吸作用所产生的内源热量和外部热量;O<sub>2</sub>吸收剂、CO<sub>2</sub>吸收剂分别吸收苹果因呼吸作用所产生的多余的O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>,调节自然气调保鲜纸箱内的O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>气体浓度或含量;水分吸收剂吸收苹果因呼吸作用、蒸腾作用所产生的水分(含水蒸汽),调节自然气调保鲜纸箱内的水分含量或相对湿度;乙烯吸收剂吸收苹果因呼吸作用所产生的乙烯,抑制新鲜苹果的呼吸速率和衰老,降低苹果所含有有机物质的转变。包装箱和苹果参数见表1。

实验果品选用陕西省白水优质红富士苹果(2008年10月中旬采摘),果品尺寸均匀,质量185~195 g。包装内部环境相对湿度是采后苹果蒸腾作用研究的重要参数,直接影响苹果的保鲜效果及贮藏期。失重量是采后苹果品质变化的重要参数,直接表征采后苹果的蒸腾速率。实验过程中,利用电子温湿度计跟踪监测自然气调包装内环境在90 d内的相对湿度;定期测定苹果质量,得到每30 d气调包装苹果、

表1 包装箱和苹果参数

Tab. 1 Parameters of apple and packaging box

苹果	数量	每个包装箱内自然气调包装24个、未包装9个
	规格	果径75 mm 平均质量190 g
包装材料	薄膜	18 μm 聚酯镀铝薄膜 O <sub>2</sub> 透气率 1.893 mL/(m <sup>2</sup> ·24h·0.1MPa) CO <sub>2</sub> 透气率 1.932 mL/(m <sup>2</sup> ·24h·0.1MPa)
	纸箱	总尺寸 480 mm×295 mm×210 mm 气调包装部分尺寸 265 mm×295 mm×210 mm 未包装部分尺寸 215 mm×295 mm×210 mm
		贮藏条件

每10 d未包装苹果的失重量数据。

## 2 蒸腾作用模型及其参数

### 2.1 实验结果

采后苹果自然气调包装内环境的相对湿度的实测结果和变化曲线见图2。显然,在保鲜贮藏期30 d

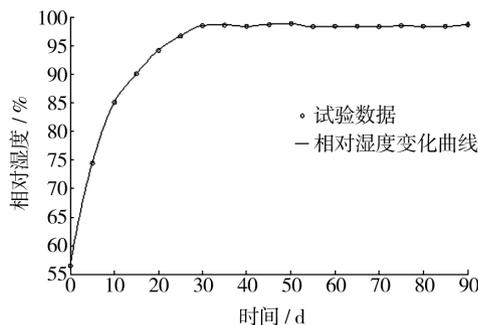


图2 自然气调包装内环境的相对湿度变化  
Fig. 2 Change of relative humidity in inner environment during MAP

内,相对湿度呈持续上升趋势;而保鲜贮藏30 d以后,相对湿度的大小保持在98.5%附近,变化很小,达到平衡状态,可认为自然气调包装内环境水蒸气已基本饱和。

气调包装、未包装2种情况下苹果蒸腾失水量的实测结果见图3。显然,在保鲜贮藏期内,2种情况下苹果的失重量都呈上升趋势,未包装苹果失重更呈明显的线性增加,且其失重量都远大于相应的保鲜贮藏期内的自然气调包装苹果,故可认为自然气调包装对减少采后苹果的失重现象具有明显作用。果品失重

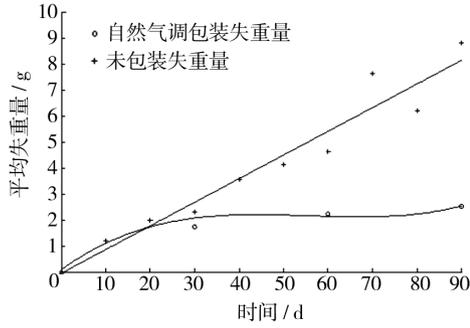


图3 未包装和自然气调包装时苹果的失重量变化

Fig. 3 Change of apple weight loss without packaging and with MAP

现象的主要原因是蒸腾作用而导致的水分散失,故可认为采后苹果的失重量就等于其水分散失量。

## 2.2 蒸腾作用模型和参数

蒸腾速率表征采后苹果蒸腾作用快慢,是蒸腾系数的一种表现形式。假设采后苹果表面局部水蒸气压强等于该情况下饱和水蒸气压强,则苹果的蒸腾速率模型可表示为<sup>[4,15]</sup>:

$$m = k(p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}} - p_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (1)$$

其中: $m$  是采后苹果的蒸腾速率 ( $\text{mol}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ); $k$  是常数; $p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}}$ ,  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  表示保鲜贮藏情况下的饱和水蒸气压强、气调包装内部的水蒸气压强(Pa)。透湿率描述了薄膜对水蒸气的透过性,其模型可表述为<sup>[9,]</sup>:

$$J = P_{\text{H}_2\text{O}} \frac{A}{D} (p_{\text{H}_2\text{O},1} - p_{\text{H}_2\text{O},2}) \quad (2)$$

其中: $J$  是透湿率 ( $\text{mol}/\text{d}$ ); $P_{\text{H}_2\text{O}}$  是水蒸气渗透系数 ( $\text{mol} \cdot \text{m}/(\text{d} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa})$ ); $A, D$  分别是薄膜表面积 ( $\text{m}^2$ )、厚度 ( $\text{m}$ ); $p_{\text{H}_2\text{O},1}$ ,  $p_{\text{H}_2\text{O},2}$  是薄膜包装外部、内部的水蒸气压强(Pa)。

基于上述果品的蒸腾速率模型、塑料薄膜的透湿性模型,假设自然气调包装时采后苹果蒸腾作用所产生的水分全部以水蒸气的形式散失,整个过程不考虑水蒸气的凝结,除透出塑料薄膜的水分之外,剩余部分以水蒸气的形式存在于气调包装内部空间中,而且认为水蒸气属于理想气体,不考虑其它包装材料对水分的吸收作用。因此,根据采后苹果蒸腾失水过程中的平衡关系得:

$$\frac{dn_{\text{H}_2\text{O},2}}{dt} = \frac{dn_{\text{H}_2\text{O},\text{tra}}}{dt} - \frac{dn_{\text{H}_2\text{O},\text{per}}}{dt} \quad (3)$$

其中: $n_{\text{H}_2\text{O},2}$ ,  $n_{\text{H}_2\text{O},\text{tra}}$  和  $n_{\text{H}_2\text{O},\text{per}}$  表示自然气调包装

内部空间的、蒸腾作用所产生的、塑料薄膜透出的水蒸气量( $\text{mol}$ ),且:

$$\frac{dn_{\text{H}_2\text{O},\text{tra}}}{dt} = m_0 k (p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}} - p_{\text{H}_2\text{O},2}) \quad (4)$$

$$\frac{dn_{\text{H}_2\text{O},\text{per}}}{dt} = P_{\text{H}_2\text{O}} \frac{A}{D} (p_{\text{H}_2\text{O},2} - p_{\text{H}_2\text{O},1}) \quad (5)$$

其中: $m_0$  是采后苹果的质量( $\text{kg}$ )。根据理想气体定律,得:

$$p_{\text{H}_2\text{O},2} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O},2} RT}{V} \quad (6)$$

其中: $R$  是理想气体常数 ( $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ); $T$  是自然气调包装内部温度 ( $\text{K}$ ); $V$  是自然气调包装内部自由空间体积 ( $\text{m}^3$ )。将式(2)和(4)–(6)、分别代入式(3),得到自然气调包装苹果的蒸腾失水方程:

$$\frac{dn_{\text{H}_2\text{O},2}}{dt} = m_0 k \left( p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}} - \frac{n_{\text{H}_2\text{O},2} RT}{V} \right) - P_{\text{H}_2\text{O}} \frac{A}{D} \left( \frac{n_{\text{H}_2\text{O},2} RT}{V} - p_{\text{H}_2\text{O},1} \right) \quad (7)$$

它是关于自然气调包装内部空间水蒸气量的方程,反映了从蒸腾失水到塑料薄膜透湿整个过程中内部空间水蒸气量的变化关系。

未包装的苹果蒸腾失水规律符合采后苹果蒸腾作用模型的数学表达式(1),故可写为:

$$\frac{dn_{\text{H}_2\text{O},\text{tra}}}{dt} = ka \quad (8)$$

其中: $a = m_0 (p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}} - p_{\text{H}_2\text{O},1})$ 。由实验数据并利用 MATLAB 软件,求解得到蒸腾失水量为:

$$m_{\text{H}_2\text{O},\text{tra}} = 18kat \quad (9)$$

对式(9)进行拟合,得到参数  $k = 1.4 \times 10^{-3}$ 。

自然气调包装情况下采后苹果蒸腾失水方程式(7)中含有若干未知参数,化简得:

$$\frac{dn_{\text{H}_2\text{O},2}}{dt} = a_1 + bn_{\text{H}_2\text{O},2} \quad (10)$$

其中: $a_1 = m_0 k_1 p_{\text{H}_2\text{O},\text{sat}} + p_{\text{H}_2\text{O},1} P_{\text{H}_2\text{O}} \frac{A}{D}$ ,  $b = -\frac{RT}{V} \cdot$

$\left( m_0 k_1 + P_{\text{H}_2\text{O}} \frac{A}{D} \right)$ 。对式(10)积分得:

$$n_{\text{H}_2\text{O},2} = \frac{ce^{bt} - a_1}{b} \quad (11)$$

对式(11)进行最小二乘法非线性拟合,可得到参数  $a_1, b, c$  的值。再将式(11)代入式(4),由实验数据并利用 MATLAB 软件,求解得到蒸腾失水量为:

$$m'_{\text{H}_2\text{O},\text{tra}} = 18k_1 (rt - se^{bt} + s) \quad (12)$$

其中:  $r = m_0 p_{\text{H}_2\text{O}, \text{sat}} + \frac{a_1 WRT}{bV}$ ,  $s = \frac{cWRT}{b^2V}$ 。因为蒸腾造成的水分迅速散失是采后苹果失重的主要原因,且在自然气调包装情况下呼吸作用受到抑制,使释放二氧化碳所造成的苹果失重极为有限,故可认为采后苹果失重的量就等于蒸腾失水的量。由此对式(12)进行最小二乘法非线性拟合,得到参数  $k_1 = 1.6006 \times 10^{-4}$ 。

### 2.3 讨论

实验结果和数值分析表明,在贮藏初期大致 20 d 内两曲线很接近,变化规律基本上趋于一致且呈线性,由于贮藏初期气调包装与未包装苹果均处于低湿环境,故贮藏最初 20 d 内气调包装苹果与未包装苹果均迅速蒸腾失水。然而,贮藏 20 d 之后,二者变化规律开始表现出明显区别,未包装苹果蒸腾失水规律仍呈线性,贮藏期内几乎保持恒定的蒸腾速率;而气调包装苹果的蒸腾速率在贮藏期内则逐渐减小,尤其是在 20 d 后此趋势很明显。选择性透气塑料薄膜对水蒸气的阻隔作用使自然气调包装内环境湿度迅速提高,抑制了采后苹果的蒸腾作用,以间接方式达到了降低蒸腾速率、保持苹果品质的目的。当相对湿度大于 90% 时,采后苹果的蒸腾作用即可得到较大程度的抑制,这也证明了相对湿度大于 90% 可有效减少采后苹果的失水现象。

### 3 结语

首先基于自然气调包装技术,设计了一种用于对比实验的包装箱。其次,通过实验分析了自然气调包装对采后苹果蒸腾作用的影响规律,获得了自然气调包装苹果的蒸腾作用模型和参数。实验结果和数值分析表明,采用瓦楞纸箱和聚酯镀铝薄膜的自然气调包装技术,可有效抑制采后苹果的蒸腾速率,实现果品保鲜贮藏。

#### 参考文献:

- [1] 高海生,赵希艳,李润丰. 果蔬采后处理与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 农业工程学报,2007,23(2):273-278.
- [2] 王红育. 生鲜预分切果蔬保鲜方法的研究进展[J]. 食品

科学,2008,29(10):645-648.

- [3] KABLAN T, MATHIAS K O, GILLES D, et al. Comparative Evaluation of the Effect of Storage Temperature Fluctuation on Modified Atmosphere Packages of Selected Fruit and Vegetables [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(3): 212-221.
- [4] LEE D S, SONG Y S, YAM K L. Application of Permeable Package System in Modified Atmosphere Packaging [J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, 27(2): 297-310.
- [5] 卢立新. 果蔬气调包装理论研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 175-180.
- [6] COLES R, MCDOWELL D, KIRWAN M J. *Food Packaging Technology* [M]. CRC Press, 2003.
- [7] SALVADOR M L, JAIME J, ORIA R. Modeling of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> Exchange Dynamics in Modified Atmosphere Packaging of Burlat Cherries [J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(2): 231-235.
- [8] IQBAL T, RODRIGUES F A S, MAHAJAN P V, et al. Mathematical Modeling of the Influence of Temperature and Gas Composition on the Respiration Rate of Shredded Carrots [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(2): 325-332.
- [9] 廖启忠. 铝箔复合软包装材料阻隔性问题研究[J]. 包装工程, 2004, 25(6): 74-82.
- [10] 杜振杰, 高万玉, 田丰, 等. 气体渗透镀铝薄膜机理研究[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 29-32.
- [11] RAFAEL A A, SINGH S P, SINGH J J. Evaluation of Oriented Poly(lactide) Polymers vs. Existing PET and Oriented PS for Fresh Food Service Containers [J]. *Packaging Technology & Science*, 2005, 18(2): 207-216.
- [12] MANGARAJ S, GOSWAMI T K, MAHAJAN P V. Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: a Review [J]. *Food Engineering Review*, 2009, 1(2): 133-158.
- [13] 鲁玉妙, 高华, 赵政阳, 等. 粉红女士苹果品质特性分析评价 [J]. 果树学报, 2003, 20(6): 503-505.
- [14] 高华, 鲁玉妙, 袁景军. 粉红女士苹果冷藏与常温贮藏的乙烯代谢及果实品质变化 [J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 46-48.
- [15] 李家庆, 张平, 张华云, 等. 果蔬保鲜手册 [K]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.