

文章编号:1673-1689(2006)02-0033-04

青豌豆呼吸速率的测定与模型表征

卢立新, 陶瑛

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:呼吸速率的测定与模型表征是实现果蔬气调包装的基础。采用封闭系统、渗透系统法测算青豌豆呼吸速率,应用 Michaelis-Menten 式方程、二次方程式进行呼吸速率模型参数表征。结果表明,封闭系统法测算值较渗透系统法低,模型结果与测定值比较吻合。

关键词: 果蔬;呼吸速率;气调包装;青豌豆;模型

中图分类号: TS 205; TS 206

文献标识码: A

Respiration Rate Measurement and Mathematical Modelling for Pea

LU Li-xin, TAO Ying

(School of Mechanical Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The measurement and mathematical modelling of respiration rate are the base for modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables. The respiration rate of pea was measured by the close system method and the permeable system method. The parameters of the respiration model were determined by applying the Michaelis-Menten equation and the quadratic equation. The results showed that the respiration rate measured by the closed system method was lower than that measured by the permeable system method. The models are suitable for charactering the respiration rate of pea.

Key words: fruit and vegetable; respiration rate; modified atmosphere packaging; pea; model

目前,气调保鲜被认为是国际上最有效最先进的果蔬保鲜方法之一,其主要机理是在维持果蔬生理状态的情况下,控制调节环境中气体成分,通过降低氧气浓度和提高二氧化碳浓度,来抑制果蔬的呼吸强度,减少果蔬体内物质消耗,从而达到延缓果蔬衰老,延长货架、贮藏期,使其保持新鲜和可食状态。

气调保鲜包含两种形式。一是气调贮藏,适合于大宗果蔬贮藏保鲜。工程表现形式是大容量的定点气调库或气调集装箱。经过多年的研究,目前

其主要技术机理与工程应用已比较成熟。二是气调包装,适合于果蔬销售保鲜,工程表现的主要形式是小容量的销售包装。气调包装技术为果蔬保鲜销售开辟了新的途径,已成为新鲜果蔬产品或半成品保鲜包装的有效技术手段。

气调包装的效果和质量受多种因素的影响,其中呼吸速率的测定与表征至关重要,它是气调包装技术机理的基础。

作者采用封闭系统法和渗透系统法测算青豌豆呼吸速率,应用 Michaelis-Menten 式方程、二次

收稿日期:2005-02-08; 修回日期:2005-04-08.

基金项目: 国家“十五”重大科技攻关专项项目(2001BA804A23).

作者简介: 卢立新(1966-),男,江苏宜兴人,副教授,包装工程专业博士研究生.

方程式进行呼吸速率模型参数表征,并对实验结果进行比较分析,以期为该产品的调包提供基础技术参数。

1 材料与方 法

1.1 材 料

青豌豆:品种为荷兰豆,采摘于无锡市某蔬菜生产基地。

包装材料:LDPE,厚度:0.033 mm, O₂ 透气率: $3.52 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$, CO₂ 透气率: $7.4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。

测试罐:自制,分别采用 LDPE 膜与金属网盖实施密封。

1.2 试验设计

试验方案:金属网盖密闭罐和 LDPE 膜封口罐,分别充入空气;贮藏温度:5 ℃;相对湿度:80%。

1.3 主要仪器和设备

MA-35 气体自动混合机, CYES-型气体测定仪,材料透气率测定仪, TG51 型标准天平,恒温恒湿机。

1.4 呼吸速率测试方法

选择大小、果色基本一致,无明显缺陷的试样,经清洗、吹干、预处理后置于测试罐中。

为同时测定估算两种气体的呼吸或生成速率,近年来出现了一些新的呼吸速率实验测量方法,主要有封闭系统法、渗透系统法、流动系统法。

1.4.1 封闭系统法 把产品装在一个定容积的密封容器中,每隔一定的时间测量容器中 O₂ 和 CO₂ 浓度的变化,继而通过以下方程估计呼吸速率^[1]:

$$R_{\text{O}_2, \text{CO}_2} = \frac{(C_{\text{O}_2, \text{CO}_2}^i - C_{\text{O}_2, \text{CO}_2}^f) \cdot V}{M \cdot (t_f - t_i)} \quad (1)$$

式中, t_i, t_f 分别为测量起始、终止时间; $C_{\text{O}_2, \text{CO}_2}^i$ 分别为测量起始 O₂、CO₂ 浓度; $C_{\text{O}_2, \text{CO}_2}^f$ 分别为测量终止时 O₂、CO₂ 浓度; V 为密封容器的自由体积; M 为产品质量。

1.4.2 渗透系统法 将产品装在一定容积大小和渗透膜组成的包装容器中。测定稳定状态下的 O₂ 和 CO₂ 的浓度。通过质量平衡方程估计呼吸速率^[2], 即

$$R_{\text{O}_2} = \frac{P_{\text{O}_2} A}{LM} \cdot (C_{\text{O}_2}^{\infty} - C_{\text{O}_2}) \quad (2)$$

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2} A}{LM} \cdot (C_{\text{CO}_2}^{\infty} - C_{\text{CO}_2}) \quad (3)$$

式中, $P_{\text{O}_2}, P_{\text{CO}_2}$ 分别包装膜 O₂、CO₂ 的透过系数; $C_{\text{O}_2}, C_{\text{CO}_2}^{\infty}$ 分别为包装内、外 O₂ 浓度; $C_{\text{CO}_2}, C_{\text{CO}_2}^{\infty}$ 分别为包装内、外 CO₂ 浓度; A 为包装膜面积; L 为包装膜厚度。

1.4.3 流动系统法 将产品装在密封容器中,气体混合物以恒定的速度流动注入容器中。当系统达到稳定状态时,由内部和外部气体浓度的绝对差值计算呼吸速度^[3]。即

$$R_{\text{O}_2} = \frac{(C_{\text{O}_2}^{\text{in}} - C_{\text{O}_2}^{\text{out}}) \cdot F}{M} \quad (4)$$

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{(C_{\text{CO}_2}^{\text{out}} - C_{\text{CO}_2}^{\text{in}}) \cdot F}{M} \quad (5)$$

式中, $C_{\text{O}_2}^{\text{in}}, C_{\text{O}_2}^{\text{out}}$ 分别为稳定状态时注入、流出 O₂ 浓度; $C_{\text{CO}_2}^{\text{in}}, C_{\text{CO}_2}^{\text{out}}$ 分别为稳定状态时注入、流出 CO₂ 浓度; F 为气体流速。

以上 3 种方法都存在局限性^[4],其中流动系统法预测气体流动的速度通常比较困难,且对比较低的呼吸速度的预测不够精确,为此采用封闭系统法和渗透系统法进行测定。

1.5 呼吸速率模型

1.5.1 呼吸速率理论模型 从 20 世纪 60 年代起,国外开始通过建立模型来分析气调包装中的气体呼吸与包装内外气体交换的动力过程。但由于果蔬产品整个呼吸过程的复杂性、实验测定的误差等因素,限制了理论模型的建立。20 世纪 80 年代后期,人们开始应用酶动力学理论来建立果蔬产品的呼吸模型。

Lee 把 CO₂ 作为 O₂ 的非竞争抑制,提出 Michaelis-Menten 式(米氏)方程用于表征果蔬呼吸速率^[5]:

$$R = \frac{V_m [C_{\text{O}_2}]}{K_m + (1 + [C_{\text{CO}_2}]/K_w)[C_{\text{O}_2}]} \quad (6)$$

式中, R 为果蔬的呼吸速率; $[C_{\text{O}_2}]$ 为包装内部的氧气浓度; $[C_{\text{CO}_2}]$ 为包装内部的二氧化碳浓度; V_m 为果蔬的最大呼吸速率; K_m 为米氏常数; K_w 为二氧化碳非竞争抑制系数。

1.5.2 呼吸速率实验模型 由于理论模型的建立存在一定的困难,同时建立的理论模型是否适合所有的果蔬种类受到了一些学者的质疑,故开展了果蔬产品呼吸速率实验模型的研究。利用测得的包装袋内 O₂、CO₂ 浓度,使用统计回归法得出呼吸速率的方程与参数。为此,基于试验的线性、二次以及考虑温度、时间的三次方程式模型被相继提出与应用。

作者采用 Yang 等提出果蔬产品呼吸速率的 2

次方程式模型^[6],在温度恒定的条件下,其表达式为:

$$R = \alpha_0 + \alpha_1 \varphi[C_{O_2}] + \alpha_2 \varphi[C_{CO_2}] + \alpha_3 \varphi[C_{O_2}]^2 + \alpha_4 \varphi[C_{CO_2}]^2 + \alpha_5 \varphi[C_{O_2}]\varphi[C_{CO_2}] \quad (7)$$

式中, $\alpha_i (i = 0, 1, \dots, 5)$ 为实验拟合常数。

2 结果与分析

2.1 呼吸速率两种测定方法的结果比较

图 1 为封闭系统法(SM)和渗透系统法(PM)测试计算结果。可以看出,用封闭系统法测得的呼吸速率比渗透系统法低。这一结果与其他学者对不同果蔬测定的研究结果一致^[7]。

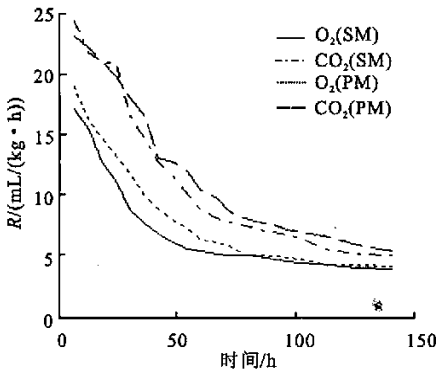


图 1 青豌豆呼吸速率两种测定方法的结果比较

Fig. 1 Comparison of the measured value with different method for CO₂ evolution and O₂ consumption of pea

2.2 呼吸速率模型表征

2.2.1 Michaelis-Menten 方程模型 为确定 Michaelis-Menten 呼吸方程参数,可将式(6)作如下变换:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{V_m} + \frac{K_m}{V_m} \frac{1}{[C_{O_2}]} + \frac{1}{K_u V_m} [C_{CO_2}] \quad (8)$$

利用测得的 $[C_{O_2}]$ 、 $[C_{CO_2}]$ 值,由公式(1)-(3)计算出对应的 R_{O_2} 和 R_{CO_2} 值后,使用统计回归法按式(8)多重线性回归可得出呼吸方程的参数。其结果见表 1。

2.2.2 二次方程式模型 同样采用两种测定方法测定计算出 R_{O_2} 和 R_{CO_2} 值,进行参数拟合可得到青豌豆呼吸模型方程分别为:

1) 封闭系统法

$$R_{O_2} = 4.0082 - 0.4583[C_{O_2}] + 0.0248[C_{CO_2}] + 0.0129[C_{O_2}]^2 - 0.0024[C_{CO_2}]^2 - 0.0004[C_{O_2}][C_{CO_2}] \quad (R^2 = 0.95)$$

$$R_{CO_2} = 8.0803 - 0.9310[C_{O_2}] + 0.0595[C_{CO_2}] + 0.0263[C_{O_2}]^2 - 0.0055[C_{CO_2}]^2 - 0.0006[C_{O_2}][C_{CO_2}] \quad (R^2 = 0.92)$$

2) 渗透系统法

$$R_{O_2} = 2.1039 - 0.1536[C_{O_2}] - 0.4262[C_{CO_2}] + 0.0028[C_{O_2}]^2 + 0.0181[C_{CO_2}]^2 - 0.0166[C_{O_2}][C_{CO_2}] \quad (R^2 = 0.91)$$

$$R_{CO_2} = -6.2209 + 0.5680[C_{O_2}] + 0.6374[C_{CO_2}] - 0.0126[C_{O_2}]^2 - 0.0158[C_{CO_2}]^2 - 0.0289[C_{O_2}][C_{CO_2}] \quad (R^2 = 0.89)$$

表 1 青豌豆气调包装 Michaelis-Menten 方程模型参数(5 °C)

Tab. 1 Michaelis-Menten model parameters of pea

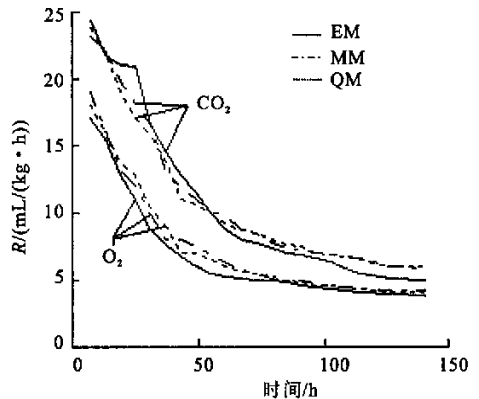
	封闭系统法				渗透系统法			
	$V_m/(mL/(kg \cdot h))$	K_m	k_u	R^2	$V_m/(mL/(kg \cdot h))$	K_m	k_u	R^2
R_{O_2}	17.57	2.31	11.69	0.94	18.03	2.73	12.12	0.92
R_{CO_2}	30.61	1.62	14.37	0.93	31.53	1.78	14.41	0.90

2.3 模型结果与测定值比较

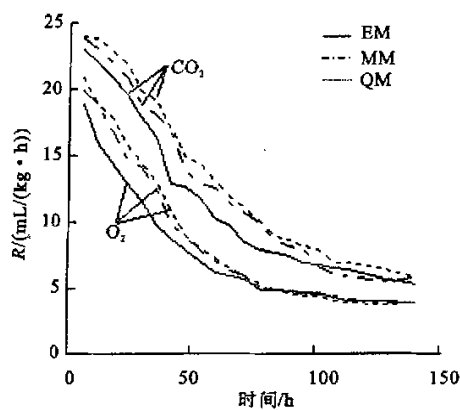
对于青豌豆,以试验测定值(EM)与 Michaelis-Menten 方程计算值(MM)、二次方程式模型计算值(QM)进行比较。图 2 表明,模型与测定值比较吻合,总体上看,封闭系统法模型结果与实际测定值更为接近。

3 结论

在分析多种测试方法的基础上,采用封闭系统法、渗透系统法分别测算青豌豆呼吸速率,应用 Michaelis-Menten 式方程、二次方程式进行其呼吸速率模型的参数拟合与表征。结果表明:



(a) 封闭系统法



(b) 渗透系统法

图2 青豌豆呼吸速率模型与测定值的比较

Fig. 2 Comparison of the measured value with calculated values by models for pea

1) 两种模型结果都可保证测试精度。总体上看,封闭系统法测算值较渗透系统法低,封闭系统法模型结果与实际测定值更为接近。

2) 封闭系统法测算青豌豆呼吸速率模型:

Michaelis-Menten 方程:

$$R_{O_2} = \frac{17.57[C_{O_2}]}{2.31 + (1 + [C_{CO_2}]/11.69)[C_{O_2}]}$$

$$R_{CO_2} = \frac{30.61[C_{O_2}]}{1.62 + (1 + [C_{CO_2}]/14.37)[C_{O_2}]}$$

二次方程式:

$$R_{O_2} = 4.0082 - 0.4583[C_{O_2}] + 0.0248[C_{CO_2}] + 0.0129[C_{O_2}]^2 - 0.0024[C_{CO_2}]^2 - 0.0004[C_{O_2}][C_{CO_2}]$$

$$R_{CO_2} = 8.0803 - 0.9310[C_{O_2}] + 0.0595[C_{CO_2}] + 0.0263[C_{O_2}]^2 - 0.0055[C_{CO_2}]^2 - 0.0006[C_{O_2}][C_{CO_2}]$$

参考文献:

- [1] Cameron A C, Boylan P W, Lee J. Design of modified atmosphere packaging system: modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits[J]. *Journal of Food Science*, 1989, 54:1413-1417.
- [2] Lakakul R, Beaudry R M, Hernandez R J. Modeling respiration of apple slices in modified-atmosphere packages[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64:105-111.
- [3] Smyth A B, Song J, Cameron A C. Modified atmosphere packaged cut iceberg lettuce, effect of temperature and O₂ partial pressure on respiration and quality[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46:4556-4562.
- [4] 卢立新. 果蔬气调包装理论研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, (7):175-180.
- [5] Lee D S, Haggart P E, Lee J. Model for fresh produce respiration in modified atmospheres based on principles of enzyme kinetics[J]. *Journal of Food Science*, 1991, 56:1580-1585.
- [6] Yang C C, Chinnan M S. Modeling the effect of O₂ and CO₂ on respiration and quality of stored tomatoes[J]. *Transaction of the ASAE*, 1988, 31: 920-925.
- [7] 徐步前,余小林. 薄膜包装中果蔬呼吸强度的测定[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(5):110-113.

(责任编辑:朱明)