

## 石榴果粒呼吸速率模型及低温气调诱导休眠方法的建立

程祖鑫, 吴圆月, 朱良, 肖凯军\*, 徐荣雄

(华南理工大学食品科学与工程学院 广州 510641)

**摘要** 通过测定石榴果粒在不同温度下休眠期内呼吸强度的变化,建立经验模型,化学动力学模型,Langmuir 模型以及非竞争型、竞争型和反竞争型的酶动力学模型等 6 种呼吸速率模型。基于气调休眠保鲜的基本理论,将果蔬呼吸过程分为诱导期、休眠期和衰亡期 3 个阶段,并通过监测贮藏环境中氧气和二氧化碳气体含量的变化,计算出果蔬休眠期起始和终止时间点。结果表明:石榴果粒呼吸强度随温度的升高而增大,在 4℃贮藏条件下竞争型酶动力学模型方程相关系数最大,对该模型进行验证,实测值与预测值之间的相对误差在 1.19%~5.45%之间,*t* 检验结果显示实测值同预测值之间无显著性差异。

**关键词** 呼吸速率模型;低温诱导休眠;呼吸特性;气调保藏

**文章编号** 1009-7848(2022)08-0244-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.08.027

果蔬是生产、生活中不可缺少的物质,其在食品以及食品加工行业中有着极大的供需量<sup>[1]</sup>。一般来说,采后果蔬仍有生命活动<sup>[2]</sup>,其含有的营养物质在体内各种酶系统和氧气的参与下,经由一系列生物氧化还原反应,逐步分解并产生能量、二氧化碳和水等物质<sup>[3]</sup>,以维持一段时间的呼吸作用。同时,这种呼吸代谢过程也会在果蔬体内留下一些有毒物质,久而久之,果蔬表皮变得褶皱,果肉变软,色泽也变得黯淡,最终衰败腐烂<sup>[4]</sup>。

气调诱导休眠保鲜,是一种通过控制贮藏环境中各气体组分含量来诱导果蔬长期处于休眠期的保鲜方法,与其它保鲜方法<sup>[5-6]</sup>,如化学保鲜、冷冻保鲜等相比,该法不仅绿色环保,还能在大幅度减少微生物腐败<sup>[7-8]</sup>的同时,缩短诱导期,推迟衰亡期,使果蔬长期处于休眠期,维持最低的生理活动消耗水平。针对不同果蔬的呼吸代谢特点,建立相应的呼吸速率模型,可在一定程度上预测其呼吸速率。如:Rocculi 等<sup>[9]</sup>基于酶动力学模型<sup>[10]</sup>,建立了鲜切苹果呼吸速率模型,试验表明该模型对鲜切苹果呼吸速率的预测较为准确,然而,随着贮藏环境温度的升高,预测精度有一定下降;Fonseca 等<sup>[11]</sup>以非竞争性米氏方程,结合羽衣甘蓝的呼吸特点

建立了呼吸速率模型,试验表明该模型有很好的相关性,相关系数达 0.96,但该模型的适用性不高,难以广泛应用。

石榴我国的产量很大,然而由于裂果和采后贮藏不当等原因,造成的损失也很大。随着人们生活质量的提高,鲜食食品越来越受青睐。若将裂果后的石榴以及采后的一部分石榴加工成鲜食食品,对于减少石榴损失,增加果农收入具有积极意义。目前对于石榴果粒的保鲜报道较少,建立石榴果粒的气调保鲜体系为石榴果粒的保鲜提供理论依据显得尤为重要。

本文以石榴果粒为研究对象,结合自发气调诱导休眠技术,基于果蔬气调休眠保鲜理论,建立多种呼吸速率模型,预测石榴果粒在休眠期内 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 含量变化,并对所建模型进行表征和验证,以期应用于石榴果粒的气调保藏。

### 1 材料与方法

#### 1.1 原料

石榴,200~250 g/个,购自会理县果园;PP 包装盒(20 cm×10 cm×3 cm),东莞市迈向达胶盒包装有限公司;致密氧化铝复合膜(100 μm),深圳市宏美嘉包装材料有限公司;密封垫圈(1 cm×1 cm×0.2 cm),上海众林机电有限公司。

#### 1.2 主要仪器设备

FA124 电子分析天平,上海梅颖浦仪器制造公司;MAP-2000 半自动气调保鲜包装,上海炬钢

收稿日期:2021-08-19

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2019B020222001);  
国家重点研发计划项目(2016YFC0400702-5)

作者简介:程祖鑫(1996—),男,硕士生

通信作者:肖凯军 E-mail: fekjxiao@scut.edu.cn

机械制造有限公司;OXYBABY M+手持气体分析仪,上海众林机电设备有限公司;XDHJ-5次氯酸钠消毒机,广州澳兰斯水处理设备有限公司;2100×950×1800石榴果粒分离机,广州达桥食品设备有限公司。

### 1.3 石榴果粒贮藏

挑选大小一致、无机械损伤、无病虫害、果色均一的石榴,以洁净水清洗表面去除杂质,经分离机分粒后用100 mg/L的自制次氯酸消毒液浸泡5 min,沥干后用清水漂洗2次,晾干,分别预冷至4,8,15,23℃。用包装机对经预冷处理的石榴果粒进行普通包装,每个PP包装盒内石榴果粒净重(100±1)g,并用致密氧化铝复合膜封口。包装好的石榴果粒分别置于对应温度4,8,15,23℃的环境下贮藏,柜内相对湿度稳定在80%~85%。

### 1.4 石榴果粒呼吸特性研究

1.4.1 石榴果粒呼吸速率的测算 果蔬的呼吸速率可以用氧气消耗率或二氧化碳生成率来表示<sup>[12]</sup>,主要有3种计算方法:密闭系统法<sup>[13-14]</sup>、渗透系统法<sup>[15-16]</sup>以及流动系统法<sup>[17-18]</sup>。

针对石榴果粒的呼吸特点,采用密闭系统法测量石榴果粒的呼吸速率,用手持气体分析仪测定不同温度下包装内顶空O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>含量。按手持气体分析仪的使用方法,取密封垫圈紧密贴在复合薄膜上,将采样针头透过密封垫圈刺入包装盒内测试,直接读取数据,每组数据测量3次,每间隔24 h测定一次气体含量,每次测试完毕后使用密封垫圈密封取样针孔。

1.4.2 低温气调诱导休眠方法的建立 通过测算贮藏期内石榴果粒呼吸速率的变化,分析其呼吸特性,建立低温气调诱导休眠方法,对低温气调贮藏果蔬在不同阶段的呼吸特征、气体含量变化进行研究分析。

### 1.5 石榴果粒呼吸模型的拟合与表征

1.5.1 呼吸模型的建立与表征 本研究根据经验模型<sup>[19]</sup>、化学动力学模型<sup>[20]</sup>、Langmuir吸收理论、酶动力学模型<sup>[11]</sup>建立了6种石榴果粒呼吸模型,通过比较模型相关系数选择最优模型,并对最优模型进行验证。

#### 1.5.1.1 经验模型

$$R=a_0+a_1\times[\text{O}_2]+a_2\times[\text{CO}_2]+a_3\times[\text{O}_2]^2+$$

$$a_4\times[\text{CO}_2]^2+a_5\times[\text{O}_2]\times[\text{CO}_2] \quad (1)$$

式中, $R$ ——果蔬呼吸速率,mL/(kg·h); $[\text{CO}_2]$ ——CO<sub>2</sub>体积分数,%; $[\text{O}_2]$ ——O<sub>2</sub>体积分数,%; $a_i$ ( $i=0,1\cdots 5$ )——公式拟合参数。

#### 1.5.1.2 基于化学动力学模型

$$R=\kappa\times[\text{CO}_2]^\alpha\times[\text{O}_2]^\beta \quad (2)$$

式中, $\kappa$ ——速率常数,与温度相关; $\alpha$ ——CO<sub>2</sub>的反应级数; $\beta$ ——O<sub>2</sub>的反应级数。

#### 1.5.1.3 基于Langmuir吸收理论的模型

$$R=\frac{a\times b\times[\text{O}_2]}{1+a\times[\text{O}_2]+a\times i\times[\text{O}_2]\times[\text{CO}_2]} \quad (3)$$

式中: $a$ 、 $i$ ——方程系数; $b$ ——果蔬最大呼吸速率,mL/(kg·h)。

#### 1.5.1.4 酶动力学模型

非竞争型模型:

$$R=\frac{V_m\times[\text{O}_2]}{K_m+(1+[\text{CO}_2]/K_i)\times[\text{O}_2]} \quad (4)$$

竞争型模型:

$$R=\frac{V_m\times[\text{O}_2]}{K_m\times(1+[\text{CO}_2]/K_i)+[\text{O}_2]} \quad (5)$$

反竞争型模型:

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

式中: $V_m$ ——果蔬最大呼吸速率,mL/(kg·h); $K_m$ ——米氏常数; $K_i$ ——方程常数。

1.5.2 呼吸模型的验证 为了确保模型的可用性,在模型建立后需要进行试验验证。对试验所得实测值与模型预测值作对比,比较两者之间的绝对误差和相对误差,并进行 $t$ 检验,通过差异性分析,对所建模型进行验证。

### 1.6 数据处理

试验结果以“平均值±标准偏差”表示,使用Origin 9.1软件绘图,采用Excel 2016软件进行样品间的差异及显著性分析, $P<0.05$ 表示具有显著统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 石榴果粒呼吸特性的研究

2.1.1 气调包装中CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>含量的变化 图1是石榴果粒在4,8,15,23℃条件下包装环境内

CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的体积变化,随着贮藏时间的延长,CO<sub>2</sub>含量逐渐升高,O<sub>2</sub>含量逐渐降低,当环境温度升高后,两条曲线产生交点。从图中还可以看出,温度升高会导致石榴果粒呼吸作用增强,包装环境内

CO<sub>2</sub>含量随温度升高而升高,O<sub>2</sub>含量则是随之降低。因此,温度能显著地影响石榴果粒的呼吸作用,在4℃环境条件下贮藏的石榴果粒在休眠期有着最低的呼吸强度。

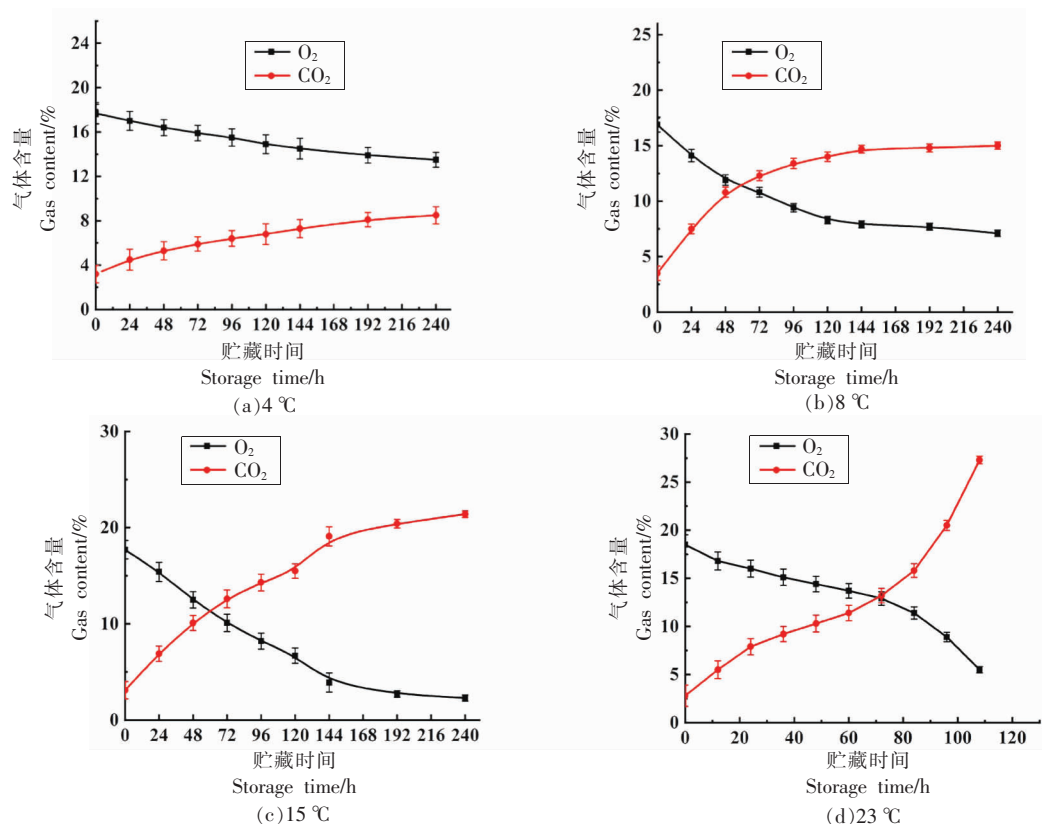
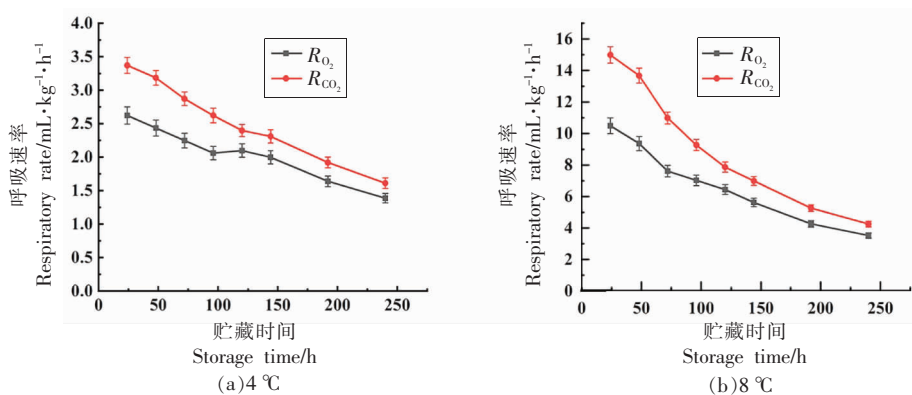


图1 不同温度下包装盒内CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>含量的变化

Fig.1 Changes of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> contents in the packaging boxes at different temperatures

2.1.2 石榴果粒呼吸强度的变化 对密闭系统法的试验数据进行处理,得到各自的呼吸强度变化结果,如图2所示。从图中可看出,石榴果粒的呼吸强度总体上呈现出不断下降的趋势,这是由于随着石榴果粒的呼吸作用,密封系统中的O<sub>2</sub>含量不断降低,新生成的CO<sub>2</sub>又不能即时排出,导致整

个密封系统形成一个低O<sub>2</sub>、高CO<sub>2</sub>的环境,相关研究报告果蔬在这样的密封环境中呼吸作用会受到一定的抑制<sup>[21-22]</sup>。随着贮藏时间的延长,呼吸强度下降速率有所减缓,并最终趋于稳定,这与Ravindra等<sup>[23]</sup>文献中报道的一致。



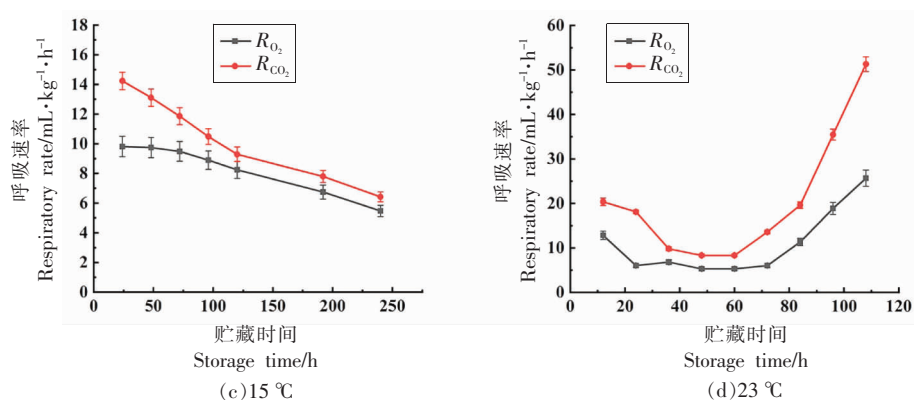


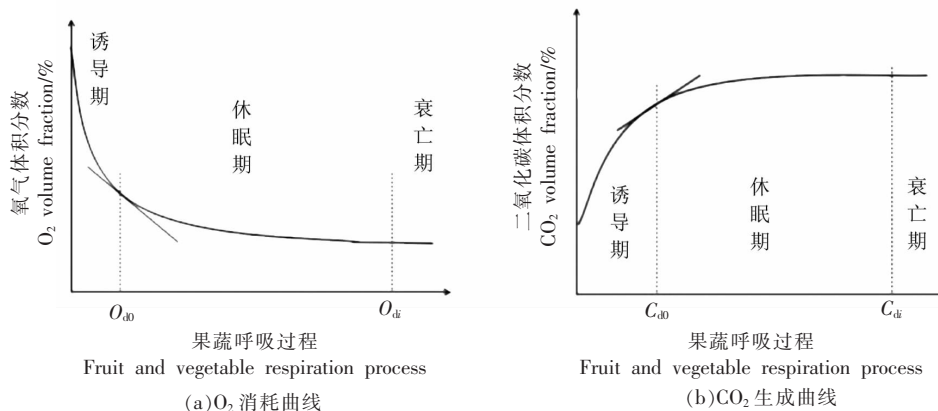
图 2 不同温度下石榴果粒呼吸速率的变化

Fig.2 Changes of respiration rate of pomegranate grains at different temperatures

在 23 °C 时,由于微生物的腐败作用,石榴果粒在贮藏期出现了霉变,表明石榴果粒不适合高温贮藏,故此温度下的呼吸强度和呼吸模型不做讨论。

### 2.1.3 石榴果粒低温气调诱导休眠方法的建立

结合图 1 中气体含量的变化,根据石榴果粒的呼吸特点,将果蔬呼吸分为 3 个过程:诱导期、休眠期、衰亡期,如图 3 所示。



注:  $O_{d0}$  表示包装盒内氧气消耗最快时的贮藏时间;  $O_{di}$  表示包装盒内氧气含量稳定时的贮藏时间;  $C_{d0}$  表示包装盒内二氧化碳生成最快时的贮藏时间;  $C_{di}$  表示包装盒内二氧化碳含量稳定时的贮藏时间。

图 3 果蔬不同呼吸阶段包装盒内的气体含量变化

Fig.3 Changes of gas content in packaging boxes of fruits and vegetables in different breathing stages

图 3a 和 3b 分别为  $O_2$  消耗曲线和  $CO_2$  生成曲线,对两条曲线作拐点为零时的切线,得到的切点所对应的时间点分别为果蔬  $O_2$  消耗的休眠期起始点  $O_{d0}$  以及  $CO_2$  生成的休眠期起始点  $C_{d0}$ 。果蔬休眠期的起始点:取氧气消耗的休眠期起始点和二氧化碳生成的休眠期起始点的平均值,即:

$$D_0(h) = \frac{O_{d0} + C_{d0}}{2} \quad (7)$$

式中:  $D_0$ ——果蔬进入休眠期时的贮藏时间, h。

同理,果蔬休眠终结点为氧气消耗的休眠期终结点和二氧化碳生成的休眠期终结点的平均值,即:

$$D_i(h) = \frac{O_{di} + C_{di}}{2} \quad (8)$$

式中:  $D_i$ ——果蔬结束休眠期时的贮藏时间, h。

果蔬在衰亡初始点细胞和组织形态显著改变,气调诱导休眠保鲜当以缩短诱导期、延长休眠期为目的,防止低温伤害和高温干耗,尽可能维持

果蔬的食用品质,延长其保鲜期。

## 2.2 石榴果粒呼吸模型的表征与验证

2.2.1 石榴果粒呼吸模型表征 为了更好地预测石榴果粒呼吸速率,采用密闭系统法测得  $O_2$  和  $CO_2$  的体积分数变化,计算得到以  $O_2$  和  $CO_2$  表示的果蔬呼吸速率  $R_{O_2}$ 、 $R_{CO_2}$ ,对数据进行拟合并建立了不同温度下的呼吸速率模型,分别是经验模型、化学动力学模型、Langmuir 吸收理论模型和酶动力学模型(3种),如表1所示。

表1为石榴果粒呼吸速率的经验模型,表2为石榴果粒呼吸速率的化学动力学模型,表3为石榴果粒呼吸速率的Langmuir吸收理论模型。由

表可知,此3个模型各模型参数随贮藏温度的升高并未表现出规律性的变化。

表4~6为石榴果粒呼吸速率的酶动力学模型。在酶动力学模型中,竞争型酶动力学模型在低温(4℃)时的模型方程拟合度最高,达到0.95以上。各模型中模型参数  $V_m$  随贮藏温度的升高而增大,与温度对酶促反应速率的影响一致<sup>[24]</sup>,到达最大反应速率一半时所需要的底物浓度  $K_m$  也随温度的升高而变大。

2.2.2 石榴果粒呼吸模型验证 根据石榴果粒在不同温度下的呼吸特性,采用4℃贮藏条件对石榴果粒进行贮藏,该温度下拟合度最高的模型为

表1 石榴果粒呼吸经验模型

Table 1 The empirical models of pomegranate grain respiration

	温度/℃	模型参数					$R^2$	
		$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$		$a_5$
$R_{O_2}$	4	-272.57	2 782.21	1 724.93	-7 060.49	-3 068.96	-8 569.99	0.900
	8	-806.62	8 077.74	6 853.19	-20 319.42	-15 086.40	-32 813.47	0.943
	15	-221.13	1 413.79	2 184.08	-1 749.20	-5 216.17	-6 808.90	0.996
$R_{CO_2}$	4	-455.70	3 990.18	3 913.20	-8 356.24	-8 011.36	-17 833.71	0.900
	8	-1 140.17	10 742.02	9 949.92	-25 226.54	-22 281.97	-45 280.91	0.968
	15	-663.08	5 610.66	5 951.55	-11 440.85	-13 215.77	-24 763.49	0.999

表2 石榴果粒呼吸化学动力学模型

Table 2 The chemical kinetic model of pomegranate grain respiration

	温度/℃	模型参数			$R^2$
		$\kappa$	$\alpha$	$\beta$	
$R_{O_2}$	4	77.83	2.50	-0.29	0.929
	8	89.30	1.06	0.02	0.945
	15	72.50	0.48	0.45	0.913
$R_{CO_2}$	4	14 999.04	4.31	0.15	0.935
	8	12 690.99	2.40	0.79	0.957
	15	31.44	0.41	0.01	0.950

表3 石榴果粒呼吸Langmuir吸收理论模型

Table 3 The Langmuir absorption theory model of pomegranate grain respiration

	温度/℃	模型参数			$R^2$
		$a$	$b/mL \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$	$i$	
$R_{O_2}$	4	$9.61 \times 10^{44}$	27.71005	246.44295	0.906
	8	6.39427	1.61295	-18.17667	0.937
	15	47.67481	8.71107	-2.17750	0.803
$R_{CO_2}$	4	$-1.82 \times 10^{43}$	72.79461	341.09317	0.776
	8	3.78573	5.32386	-24.13501	0.846
	15	37.64609	22.50609	5.54677	0.960

表4 石榴果粒呼吸非竞争型酶动力学模型

Table 4 The non-competitive enzyme kinetic model of pomegranate grain respiration

	温度/°C	模型参数			
		$V_m/\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	$K_m$	$K_i$	$R^2$
$R_{O_2}$	4	10.71485	0.03632	0.01612	0.952
	8	11.64304	0.02061	3.04125	0.904
	15	58.70115	0.57646	0.12407	0.963
$R_{CO_2}$	4	20.32110	0.10323	0.01052	0.926
	8	22.50729	0.02656	0.18026	0.960
	15	79.59898	0.40632	0.04461	0.830

表5 石榴果粒呼吸竞争型酶动力学模型

Table 5 The competitive enzyme kinetic model of pomegranate grain respiration

	温度/°C	模型参数			
		$V_m/\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	$K_m$	$K_i$	$R^2$
$R_{O_2}$	4	10.86615	0.21801	0.03190	0.984
	8	11.01926	0.01481	0.53072	0.943
	15	81.61158	0.86176	0.81202	0.945
$R_{CO_2}$	4	17.35599	0.29980	0.03461	0.953
	8	62.21861	0.72573	-0.29014	0.921
	15	276.89128	0.57630	0.03557	0.991

表6 石榴果粒呼吸反竞争型酶动力学模型

Table 6 The anticompetitive enzyme kinetic model of pomegranate grain respiration

	温度/°C	模型参数			
		$V_m/\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	$K_m$	$K_i$	$R^2$
$R_{O_2}$	4	5.59548	0.0048	0.04163	0.961
	8	12.9257	0.0086	0.44080	0.958
	15	82.5946	0.8792	0.91530	0.944
$R_{CO_2}$	4	20.1054	0.1090	0.01845	0.953
	8	21.1787	0.0109	0.18860	0.959
	15	108.4432	0.7348	0.42370	0.954

竞争型酶动力学模型,因此以竞争型酶动力学模型为石榴果粒最优呼吸模型,模型方程如公式(9)、(10):

$$R_{O_2} = \frac{10.86615 \times [O_2]}{0.21801 \times (1 + [CO_2] / 0.0319) + [O_2]} \quad (9)$$

$$R_{CO_2} = \frac{17.35599 \times [O_2]}{0.2998 \times (1 + [CO_2] \times 0.03461) + [O_2]} \quad (10)$$

呼吸模型建立后,需对模型进行验证以确保模型确实可用。对4℃条件下的竞争型酶动力学模型进行验证,将实测值与预测值作比较,并进行差异分析,验证结果如表7所示。

由表可知,实测值与预测值之间的绝对误差在0.03~0.14 mL/(kg·h)之间,相对误差在1.19%~

5.45%之间,对实测值与预测值进行t检验,结果显示实测值同预测值之间无显著性差异。由图4可看出实测值与预测值之间具有较好的吻合性。即该模型在4℃条件下可以用来预测石榴果粒的呼吸速率。

### 3 结论

本研究结合自发气调保鲜技术,以石榴果粒为研究对象,通过建立气调休眠呼吸模型,对石榴果粒呼吸速率进行预测,并对呼吸模型进行表征和验证。石榴果粒的呼吸速率随贮藏温度的升高而增大,随贮藏时间的延长而衰减,低O<sub>2</sub>、高CO<sub>2</sub>的环境氛围能在一定程度上抑制果蔬呼吸。针对

表7 石榴果粒呼吸模型

Table 7 Respiration model of fresh-cut pomegranate

	贮藏时间/h	实测值/	预测值/	绝对误差/	相对误差/%	<i>t</i> 检验
		$\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$		
$R_{\text{O}_2}$	24	2.622	2.682	0.06	2.29	$P=0.72>0.05$
	48	2.435	2.406	0.03	1.19	
	72	2.248	2.125	0.12	5.45	
	96	2.060	2.020	0.04	1.96	
	120	2.098	1.906	0.10	5.05	
$R_{\text{CO}_2}$	24	3.371	3.467	0.10	2.85	$P=0.93>0.05$
	48	3.184	3.100	0.08	2.65	
	72	2.872	2.729	0.14	4.96	
	96	2.622	2.591	0.03	1.19	
	120	2.397	2.441	0.04	1.84	

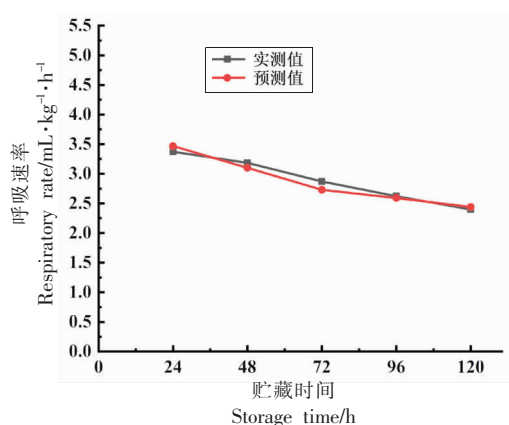


图4 石榴果粒呼吸速率实测值与预测值

Fig.4 The measured and predicted respiration rates of pomegranate grains

石榴果粒呼吸特点,提出了果蔬休眠期起始点和终止点的计算方法,并建立了6种呼吸速率模型。结果表明:在4℃贮藏条件下竞争型酶动力学模型方程相关系数最大,以此为该温度下的最优呼吸模型,并对该模型进行验证,实测值与预测值之间的相对误差在1.19%~5.45%之间,吻合性较好,*t*检验结果显示实测值同预测值之间无显著性差异,表明该模型在4℃条件下可以用来预测石榴果粒的呼吸速率。

## 参 考 文 献

- [1] HASSAN B, CHATHA S A S, HUSSAIN A I, et al. Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109(1): 1095-1107.
- [2] 马修钰, 王建清, 王玉峰, 等. 果蔬保鲜方法概述[J]. 中国果菜, 2016, 36(6): 4-9.  
MA Y X, WANG J Q, WANG Y F, et al. An overview of the preservation methods of fruits and vegetables[J]. China Fruit and Vegetable, 2016, 36(6): 4-9.
- [3] MEYER B S, ANDERSON D B, BOHLING R H, et al. Introduction to plant physiology[J]. Aibs Bulletin, 1973, 10(3): 39-40.
- [4] LUNA M C, MARTINEZ-SANCHEZ A, SELMA M V, et al. Influence of nutrient solutions in an open-field soilless system on the quality characteristics and shelf life of fresh-cut red and green lettuces (*Lactuca sativa* L.) in different seasons[J]. J Sci Food Agric, 2013, 93(2): 415-421.
- [5] 赵芳. 各种果蔬保鲜技术对比[J]. 中国食品, 2019, 767(7): 128-129.  
ZHAO F. Comparison of various fruit and vegetable preservation technologies [J]. Chinese Food, 2019, 767(7): 128-129.
- [6] 陈永春. 气调贮藏——果蔬保鲜的最佳贮藏方法[J]. 新疆农垦科技, 2011, 34(4): 68-69.  
CHEN Y C. Modified atmosphere storage - the best storage method for fruit and vegetable preservation[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2011, 34(4): 68-69.
- [7] 崔建云, 任发政, 郑丽霞, 等. 现代食品包装技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005: 45-61.

- CUI J Y, REN F Z, ZHENG L X, et al. Novel food packaging techniques[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2005: 45-61.
- [8] 郑永华. 食品贮藏保鲜[M]. 北京: 中国计量出版社, 2006: 62-88.
- ZHENG Y H. Food storage and preservation [M]. Beijing: China Metrology Press, 2006: 62-88.
- [9] ROCCULI P, NOBILE M A D, ROMANI S, et al. Use of a simple mathematical model to evaluate dipping and MAP effects on aerobic respiration of minimally processed apples[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 334-340.
- [10] PEPPELEENBOS H W, LEVEN J V. Evaluation of four types of inhibition for modelling the influence of carbondioxide on oxygen consumption of fruits and vegetables[J]. Postharvest Biology and Technology, 1996, 7(1): 27-40.
- [11] FONSECA S C, OLIVEIRA F A R, FRIAS J M, et al. Modelling respiration rate of shredded Galega kale for development of modified atmosphere packaging[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(4): 299-307.
- [12] FONSECA S C, OLIVEIRA F A R, BRECHT J K. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(2): 99-119.
- [13] FISHMAN S, RODOV V, BENYEHOSHUA S. Mathematical model for perforation effect on oxygen and water vapor dynamics in modified-atmosphere packages[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(5): 956-961.
- [14] JACXSENS L, DEVLIEGHIERE F, DEBEVERE J. Validation of a systematic approach to design equilibrium modified atmosphere packages for fresh-cut produce [J]. LWT -Food Science and Technology, 1999, 32(7): 425-432.
- [15] MCLAUGHLIN C P, APOS O, BEIRNE D, et al. Respiration rate of a dry coleslaw mix affected by storage temperature and respiratory gas concentrations[J]. Journal of Food Science, 2010, 64(1): 116-119.
- [16] MUCHIRI D R, MAHUNGU S M, GITUANJA S N. Modified atmosphere packaged cut iceberg lettuce: Effect of temperature and O<sub>2</sub> partial pressure on respiration and quality[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(11): 4556-4562.
- [17] PIERGIOVANNI L, FAVA P, CERIANI S. A simplified procedure to determine the respiration rate of minimally processed vegetables in flexible permeable packaging[J]. Italian Journal of Food Science, 1999, 11(2): 99-110.
- [18] LAKAKUL R, BEAUDRY R M, HERNANDEZ R J. 133 modified-atmosphere packaging of lightly processed apple fruit: Package oxygen permeability requirements[J]. HortScience, 1994, 29(5): 447.
- [19] YANG C C, CHINNAN M S. Computer modeling of gas composition and color development of tomatoes stored in polymeric film[J]. Journal of Food Science, 1988, 53(3): 869-872.
- [20] 段华伟. 鲜果气调包装的理论与试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- DUAN H W. Theoretical and experimental research on modified atmosphere packaging for fresh fruit[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.
- [21] 雷桥, 徐文达. 蘑菇气调包装系统[J]. 食品与机械, 2002, 18(5): 30-31.
- LEI Q, XU W D. Modified atmosphere packaging system for mushrooms[J]. Food and Machinery, 2002, 18(5): 30-31.
- [22] AN J S, ZHANG M, ZHAN Z G. Effect of packaging film on the quality of 'Chaoyang' honey peach fruit in modified atmosphere packages[J]. Packaging Technol Sci, 2007, 20(1): 71-76.
- [23] RAVINDRA M R, GOSWAMI T K. Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2): 239-248.
- [24] 朱康民. 米氏方程及奈氏方程的意义及其在生理学中的应用[J]. 四川生理科学杂志, 1986, 8(1): 21-23.
- ZHU K M. The significance of Michaelis-Menten equation and Lineweaver-Burk equation and their application in physiology[J]. Sichuan Journal of Physiological Science, 1986, 8(1): 21-23.



## Establishment of Respiration Rate Models of Pomegranate Granules and a Method for Inducing Dormancy with Low Temperature Gas Regulation

Cheng Zuxin, Wu Yuanyue, Zhu Liang, Xiao Kaijun\*, Xu Rongxiang

(College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

**Abstract** In this study, six different types of respiration rate models, including the empirical model, chemical kinetic model, Langmuir model, and non-competitive, competitive, and anti-competitive enzyme kinetic models, were developed by monitoring the variation in the intensity of pomegranate fruit respiration throughout the dormant phase at various temperatures. Based on the basic theory of controlled atmosphere dormancy preservation, the respiration process of fruits and vegetables was divided into three stages: induction, dormancy and decay. The beginning and conclusion of the dormant period were determined by measuring changes in the oxygen and carbon dioxide gas contents in the storage environment. The results showed that the respiration intensity of pomegranate grains increased with the increase in temperature, and the correlation coefficient of the competitive enzyme kinetic model equation was the largest under the storage condition of 4 °C. The relative error between the measured value and the predicted value was 1.19%–5.45%, and the *t*-test results showed no significant difference between the measured value and the predicted value.

**Keywords** respiratory rate model; low temperature induced dormancy; breathing properties; modified atmosphere preservation