

基于 Langmuir 吸附理论的双孢蘑菇呼吸速率模型^{*}

王 娟 王相友 朱继英 刘战丽
(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

【摘要】 研究了不同温度(5、10、15、20、25℃)下,气调包装的双孢蘑菇呼吸速率随贮藏时间的变化规律。结果表明,双孢蘑菇的呼吸速率随着贮藏时间的延长而不断降低,直至达到动态平衡状态。利用 Langmuir 吸附理论对双孢蘑菇呼吸速率的测定值进行了解析,建立了不同贮藏温度下的呼吸速率模型。结果显示,双孢蘑菇的呼吸速率随贮藏环境中 O₂ 体积分数的增加而升高,随 CO₂ 体积分数的增加而降低;最大呼吸速率随温度的增加而增加,且与贮藏温度之间满足 Arrhenius 方程。

关键词: 双孢蘑菇 薄膜气调包装 呼吸速率 数学模型 吸附理论
中图分类号: S609⁺.3; S646.1⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)04-0110-06

Respiration Rate Model of *Agaricus bisporus* Based on
Langmuir Adsorption Theory

Wang Juan Wang Xiangyou Zhu Jiying Liu Zhanli
(School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract

The change of respiration rate of *Agaricus bisporus*, packed in film, with storage time was studied at the storage temperature of 5℃、10℃、15℃、20℃ and 25℃. The results indicated that the mushroom respiration rate showed a significant decrease with increasing storage period until dynamic equilibrium. A respiration model of *Agaricus bisporus*, based on Langmuir adsorption theory, was proposed at different temperatures. The results suggested that the mushroom respiration rate increased with increasing of O₂ concentrations, and decreased with increasing of CO₂ concentrations. The maximum rate increased with temperature, and the relationship between maximum rate and temperature was well described by the Arrhenius equation.

Key words *Agaricus bisporus*, MAP, Respiration rate, Mathematical model, Adsorption theory

引言

新鲜双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 色泽洁白, 营养丰富, 组织细嫩, 但其含水率高, 菌盖表面没有明显的保护结构, 采后后熟过程极其活跃, 影响其商品质量和货架寿命, 给生产和贮运造成很大损失和制约^[1~4]。薄膜气调包装(modified atmosphere packaging, 简称 MAP) 是利用塑料薄膜包装果蔬产品的呼吸作用与薄膜透气性之间的平衡, 在包装内形成一种高

CO₂、低 O₂ 浓度的微环境, 由此抑制果蔬产品的代谢作用, 从而达到延长其贮藏寿命的技术^[5~6]。有效的气调包装能抑制双孢蘑菇的呼吸速率及新陈代谢, 延缓衰老达到保鲜的效果^[1,7~8]。在进行 MAP 设计时, 果蔬呼吸强度取值的准确性, 将直接影响到 MAP 系统气体组成的合理性^[9]。然而果蔬的呼吸速率各不相同, 所建立的呼吸速率模型大多以经验公式为主, 如指数形式、多项式形式的呼吸速率方程, 缺乏必要的理论依据, 适用性受到了很大的限制。Makino 等^[10] 根据 Langmuir 吸附理论研究了鲜

收稿日期: 2010-11-06 修回日期: 2010-12-09
^{*} 国家自然科学基金资助项目(30871757)和国家农业科技成果转化资金资助项目(2010GB2C600253)
作者简介: 王娟, 讲师, 主要从事农产品加工及贮藏研究, E-mail: wangjuan7912@163.com
通讯作者: 王相友, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工及贮藏研究, E-mail: wxy@sdut.edu.cn

切卷心菜和花椰菜的呼吸模型,但目前尚未见将吸附理论应用于其他果蔬的呼吸建模研究。

本文以双孢蘑菇为研究对象,研究其在 5、10、15、20 和 25℃ 下,MAP 贮藏过程中呼吸速率的变化趋势,并根据 Langmuir 吸附理论,对实验数据进行回归,建立不同贮藏温度下双孢蘑菇呼吸速率随 O₂、CO₂体积分数变化的数学模型,此模型可为气调包装参数的选择提供理论基础。

1 基于 Langmuir 吸附理论的呼吸模型

根据 Makino 等^[10]的假设:在细胞的 O₂消耗过程中,一分子 O₂吸附在线粒体内膜的细胞色素 C 氧化酶的一个活性位上,而当细胞色素 C 氧化酶与 O₂结合的活性位接受 4 个电子时,O₂ 则从活性位上解吸附下来,形成 2 分子 H₂O^[11]。这种细胞色素 C 氧化酶的反应占细胞氧消耗的 90% 以上^[12]。因此,可用单位细胞上的 O₂浓度与空位数量的乘积来计算每小时新鲜果蔬单位质量中吸附在活性位上的 O₂分子数量,即

$$V_a = K_a C_o (1 - \theta) N_T \tag{1}$$

式中 V_a ——O₂分子吸附速率,kg⁻¹·h⁻¹
 C_o ——单位细胞中的 O₂浓度,mmol/kg
 θ ——O₂分子占活性位的百分比,%
 K_a ——比例常数的平均值,体现了活性位对 O₂分子的亲和力,kg/(mmol·h)
 N_T ——活性位的总量,kg⁻¹

由 Henry 定律可知,单位细胞中的 O₂浓度与 O₂的分压成正比,因此可得

$$C_o = S_o P_o \tag{2}$$

式中 S_o ——比例常数,mmol/(kg·kPa)
 P_o ——环境中的 O₂分压,kPa

Miller 等^[13]研究报道,CO₂并不直接抑制活性位中细胞色素 C 氧化酶的反应,但 CO₂可引起 TCA 循环基板及 NADH 的氧化磷酸化速率,其中,NADH 可促进 O₂分子从活性位上解吸附。因此,CO₂可间接抑制那些已经吸附在活性位上的 O₂分子解吸附。假设当吸附在活性位上的一部分 O₂分子从活性位上解吸附的能力被抑制时, θ 可被分为两种类型

$$\theta = \theta_f + \theta_i \tag{3}$$

式中 θ_f ——可从活性位上自由解吸附的 O₂分子的吸附百分比

θ_i ——从活性位上解吸附能力被抑制的 O₂分子的吸附百分比

由 Langmuir 吸附理论^[10]知,单位时间内气体分子从活性位上解吸附的数量与可从活性位上自由解

吸附的气体分子数量成正比。因此,果蔬中吸附在活性位上的 O₂分子的解吸附速率为

$$V_d = K_d \theta_f N_T \tag{4}$$

式中 K_d ——O₂分子从活性位上解吸附的比例常数平均值,h⁻¹

假设单位时间内被抑制解吸附能力的 O₂分子数量与细胞内 CO₂浓度及从活性位上能自由解吸附 O₂分子的吸附数量成正比,则

$$V_i = K_i C_c \theta_f N_T \tag{5}$$

式中 V_i ——单位时间内被抑制解吸附能力的 O₂分子的数量,kg⁻¹·h⁻¹

K_i ——抑制解吸附程度的比例常数,kg/(mmol·h)

C_c ——细胞中的 CO₂浓度,mmol/kg

同样根据 Henry 定律可得

$$C_c = S_c P_c \tag{6}$$

式中 S_c ——比例常数,mmol/(kg·kPa)

P_c ——环境中的 CO₂分压,kPa

假设抑制解吸附能力的 O₂分子单位时间消除抑制性的分子数量与已被抑制解吸附能力的 O₂分子数量成正比,则

$$V_f = K_f \theta_i N_T \tag{7}$$

式中 V_f ——单位时间内被抑制解吸附能力的 O₂分子消除抑制性分子数量,kg⁻¹·h⁻¹

K_f ——解除吸附抑制程度的比例常数,kg/(mmol·h)

当达到平衡状态时,O₂吸附速率与解吸附速率相同,抑制速率与消除抑制的速率相同,即 $V_a = V_d$, $V_i = V_f$ 时,将式(1)~(7)分别代入可解得

$$\theta_f = \frac{a_1 P_o}{1 + a_1 P_o + a_1 i_1 P_o P_c} \tag{8}$$

其中 $a_1 = \frac{K_a S_o}{K_d} \tag{9}$

$$i_1 = \frac{K_i S_c}{K_f} \tag{10}$$

因为 θ_f 的定义为可以从活性位上自由解吸附的 O₂分子的吸附百分比,因此又可表示为

$$\theta_f = N_A / N_T \tag{11}$$

式中 N_A ——可自由解吸附的 O₂分子数,kg⁻¹

由于 O₂分子的解吸附反应,活性位会释放一个 O₂分子,也就相当于果蔬呼吸消耗了一个 O₂分子。由式(4)和式(11)可知,果蔬的 O₂消耗速率可表示为

$$r_o = \frac{K_d N_A V_m}{A_N} \tag{12}$$

式中 r_o ——O₂消耗速率,mL/(kg·h)

A_N ——阿伏伽德罗常数, mmol^{-1}
 V_m ——摩尔体积, 取 22.4 L/mol
由式(11)可知, 当 $\theta_f = 1$ 时的 O_2 分子解吸附 (或消耗) 速率取最大值为 $K_d N_T$, 因此 O_2 最大消耗速率可表示为^[14]

$$b_1 = \frac{K_d N_T V_m}{A_N} \tag{13}$$

式中 b_1 —— O_2 最大消耗速率, $\text{mL}/(\text{kg} \cdot \text{h})$
果蔬贮藏环境通常为一个大气压, 且较恒定, 因此可用气体的体积分数代替式(8)中的气体分压, 再联合式(8)~(13)可得

$$r_o = \frac{a_1 b_1 y_o}{1 + a_1 y_o + a_1 i_1 y_o y_c} \tag{14}$$

式中 y_o ——贮藏环境中的 O_2 体积分数, %
 y_c ——贮藏环境中的 CO_2 体积分数, %
式(14)即果蔬 O_2 消耗速率模型, 由呼吸熵 R_Q 的定义可知, 果蔬 CO_2 产生速率为

$$r_c = R_Q r_o \tag{15}$$

假设在相同气体环境下果蔬的呼吸熵 R_Q 为常数, 则认为果蔬 CO_2 产生速率模型也符合式(14), 因此 r_c 模型为

$$r_c = \frac{a_2 b_2 y_o}{1 + a_2 y_o + a_2 i_2 y_o y_c} \tag{16}$$

式中 a_2, b_2, i_2 ——呼吸模型系数

2 材料与方法

2.1 材料

双孢蘑菇采自山东省临淄区边河镇南术北村。双孢蘑菇采后立即运至山东理工大学试验冷库, 预冷 $12 \sim 20 \text{ h}$ 后, 挑选菇体完整、颜色洁白、菇盖未开伞、无病虫害、无机械伤、子实体直径 $25 \sim 35 \text{ mm}$ 的双孢蘑菇进行试验。

选择厚度为 0.02 mm 的低密度聚乙烯 (LDPE) 薄膜为试验薄膜, 包装袋规格为 $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 。薄膜在不同温度下的透气系数如表 1 所示。

表 1 不同温度下薄膜的透气系数

Tab.1 Gas permeability coefficients in different temperatures $\text{mL} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$			
温度 / $^{\circ}\text{C}$	气体成分		
	O_2	CO_2	N_2
5	1.106×10^{-7}	1.614×10^{-7}	1.589×10^{-7}
10	1.522×10^{-7}	2.152×10^{-7}	2.114×10^{-7}
15	2.073×10^{-7}	2.841×10^{-7}	2.784×10^{-7}
20	2.625×10^{-7}	3.716×10^{-7}	3.632×10^{-7}
25	3.726×10^{-7}	4.816×10^{-7}	4.696×10^{-7}

2.2 试验方法

将 4 个双孢蘑菇称量后放入薄膜袋中热封, 为统一袋内初始空气量, 先在薄膜袋表面贴一防漏隔膜垫片, 用真空泵抽真空后, 再用注射器注入定量空气 (500 mL)。将包装完成的双孢蘑菇分别置于 $5、10、15、20$ 和 25°C 的恒温箱中, 1 h 测量包装袋内的 O_2 和 CO_2 体积分数 1 次, 每个处理重复 3 次。

气样分析采用 GC-9800TFP 型专用气相色谱仪 (上海科创色谱仪器有限公司)。色谱柱为 GDX-104 和 5A 分子筛联合柱。载气为氢气, 柱温为 55°C , 热导检测器温度为 110°C 。

2.3 呼吸速率测定

呼吸速率测定采用改进的渗透系统法^[15]。将包装袋中的气体移动视为一动态平衡过程, 某一时间间隔后, 袋内 $\text{O}_2、\text{CO}_2$ 和 N_2 的体积改变表示为^[15~16]

$$\text{d}V_o = \frac{Ap_o}{L} \left(\frac{x_o P_o}{100} - \frac{y_o P}{100} \right) \text{d}t - r_o W \text{d}t \tag{17}$$

$$\text{d}V_c = \frac{Ap_c}{L} \left(\frac{x_c P_o}{100} - \frac{y_c P}{100} \right) \text{d}t - r_c W \text{d}t \tag{18}$$

$$\text{d}V_N = \frac{Ap_N}{L} \left(\frac{x_N P_o}{100} - \frac{y_N P}{100} \right) \text{d}t \tag{19}$$

$$\text{d}V_s = \text{d}V_o + \text{d}V_c + \text{d}V_N \tag{20}$$

式中 $\text{d}V_o、\text{d}V_c、\text{d}V_N$ ——某一时间间隔后 $\text{O}_2、\text{CO}_2、\text{N}_2$ 的体积变化, mL

$\text{d}V_s$ ——某一时间间隔后总体积变化, mL

L ——包装薄膜的厚度, m

A ——包装薄膜小袋的表面积, m^2

$P_o、P_c、P_N$ —— $\text{O}_2、\text{CO}_2、\text{N}_2$ 的气体透过系数, $\text{mL} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$

$x_o、x_c、x_N$ ——包装袋外 $\text{O}_2、\text{CO}_2、\text{N}_2$ 的体积分数, %

y_N ——贮藏环境中 N_2 体积分数, %

W ——果蔬质量, kg t ——时间, h

$P、P_o$ ——包装袋内、外气体压强, Pa

经过 $\text{d}t$ 时间后包装袋内 $\text{O}_2、\text{CO}_2$ 和 N_2 的体积分数为

$$y_o^t/100 = (V_{sy_o^0}/100 + \text{d}V_o)/(V_s + \text{d}V_s) \tag{21}$$

$$y_c^t/100 = (V_{sy_c^0}/100 + \text{d}V_c)/(V_s + \text{d}V_s) \tag{22}$$

$$y_N^t/100 = (V_{sy_N^0}/100 + \text{d}V_N)/(V_s + \text{d}V_s) \tag{23}$$

式中 $V_o、V_c、V_N、V_s$ ——袋内 $\text{O}_2、\text{CO}_2、\text{N}_2$ 的体积及气体总体积, mL

$y_o^t、y_c^t、y_N^t$ —— t 时刻袋内 $\text{O}_2、\text{CO}_2、\text{N}_2$ 的体积分数, %

$y_o^{t_0}、y_c^{t_0}、y_N^{t_0}$ —— t_0 时刻袋内 $\text{O}_2、\text{CO}_2、\text{N}_2$ 的体积分数, %

先假设某一时刻 r_o 和 r_c 的值,将式(17)~(20)代入式(21)~(23)计算,对所得各气体体积分数计算值与包装袋内气体体积分数的实测值进行比较,用最小二乘法反复迭代,差值最小时所对应的预设值即为所求果蔬的真实呼吸速率。计算采用 Matlab 程序完成^[17]。

3 结果和讨论

图 1 为不同贮藏温度下,包装袋内双孢蘑菇呼吸速率随贮藏时间的变化曲线。由图可以看出,在

不同贮藏温度下双孢蘑菇的呼吸速率均随着贮藏时间的延长而逐渐降低,直到达到动态平衡状态后,呼吸速率不再继续降低。双孢蘑菇在贮藏过程中的整体呼吸速率随着贮藏温度的升高而升高,说明低温能够有效抑制双孢蘑菇的呼吸速率。由图还可以看出,随着贮藏时间的延长,双孢蘑菇呼吸强度的变化速率逐渐变缓,这是由于双孢蘑菇的呼吸作用,使得包装袋内的 O_2 体积分数不断降低, CO_2 体积分数不断升高,形成了低 O_2 、高 CO_2 的气体环境,从而又抑制了双孢蘑菇的呼吸。

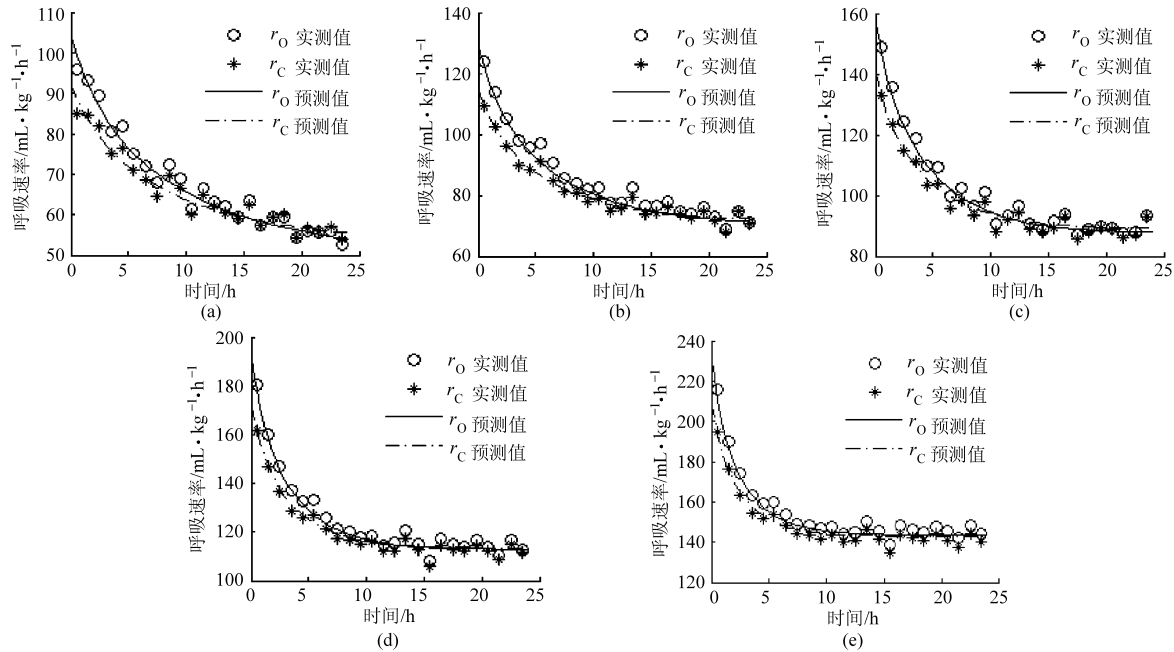


图 1 不同温度下双孢蘑菇呼吸速率实测值及模拟曲线

Fig.1 Experimental values and simulation of mushroom respiration rate
(a) 5 °C (b) 10 °C (c) 15 °C (d) 20 °C (e) 25 °C

由图 1 还可以看出,在贮藏初期双孢蘑菇的 O_2 消耗速率明显高于 CO_2 产生速率,而在贮藏过程中, O_2 消耗速率下降的速度较 CO_2 快,造成在贮藏后期 O_2 消耗速率与 CO_2 产生速率相近,甚至低于 CO_2 产生速率。图 2 为在不同贮藏温度下双孢蘑菇呼吸熵随贮藏时间的变化曲线。由图可知,随着贮藏时间的延长,双孢蘑菇在各温度下的呼吸熵均不断增加。在贮藏初期,双孢蘑菇的呼吸熵随着贮藏温度的升高而升高,而在贮藏后期,其呼吸熵随着贮藏温度的升高而降低。

为了减小贮藏时间对双孢蘑菇呼吸速率模型的影响,选择包装袋内气体体积分数未达到平衡状态之前的数据进行分析。将式(14)、(16)变形为线性形式为

$$\frac{1}{r_o} = \frac{1}{b_1} + \frac{1}{a_1 b_1 y_o} + \frac{i_1 y_c}{b_1} \tag{24}$$

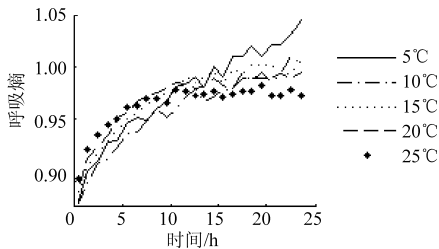


图 2 双孢蘑菇呼吸熵随贮藏时间变化曲线

Fig.2 Mushroom respiratory quotient vs storage time

$$\frac{1}{r_c} = \frac{1}{b_2} + \frac{1}{a_2 b_2 y_o} + \frac{i_2 y_c}{b_2} \tag{25}$$

根据包装系统内 O_2 和 CO_2 体积分数和所对应的双孢蘑菇 O_2 、 CO_2 的呼吸速率值,利用 Matlab 程序进行多重线性回归分析,得到呼吸模型的参数值,如表 2 所示。

由表 2 可以看出,不同贮藏温度下,双孢蘑菇 O_2 消耗速率模型的相关系数达到了 0.95 以上, CO_2

表 2 呼吸模型中的 b 、 a 、 i 及相关系数 R^2 的值
Tab.2 b, a, i and coefficients R^2 in respiration model

温度/ ℃	r_0				r_c			
	b_1	a_1	i_1	R^2	b_2	a_2	i_2	R^2
5	112.569	0.479	0.042	0.965 0	95.687	0.873	0.33	0.941 4
10	142.494	0.563	0.050	0.951 0	119.333	0.997	0.037	0.926 7
15	175.861	0.601	0.052	0.969 3	148.484	1.196	0.041	0.947 2
20	211.847	0.562	0.048	0.968 0	179.715	1.019	0.038	0.953 2
25	253.802	0.603	0.048	0.971 0	219.307	0.881	0.037	0.956 8

产生速率模型的相关系数也达到了 0.92 以上。模型的预测值同样表示在图 1 中,由图也可看出模型与实测值的相关性很高。双孢蘑菇呼吸模型中的参数均大于零,由此可知,双孢蘑菇的呼吸速率随着贮藏环境中 O₂体积分数的增加而升高,随着 CO₂体积分数的增加而降低。因此,在双孢蘑菇贮藏过程中,可适当降低(或升高)贮藏环境中的 O₂(CO₂)体积分数,以抑制其呼吸速率。

由表 2 可知, b 值随着温度的增大而增大。将 $\ln b$ 与 $1/T$ 进行线性回归,如图 3 所示, $\ln b$ 与 $1/T$ 满

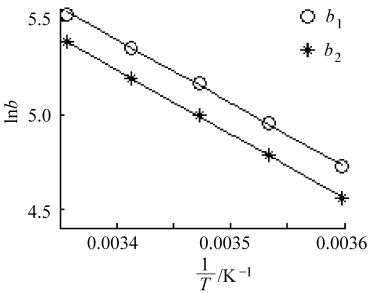


图 3 回归曲线
Fig.3 Regression curves

足线性关系。所以 b 与贮藏温度的关系满足 Arrhenius 方程,即

$$\ln b_1 = 16.803 - 3\,354.2/T \tag{26}$$

$$\ln b_2 = 16.895 - 3\,428.0/T \tag{27}$$

4 结论

(1) 研究了不同温度下,MAP 贮藏的双孢蘑菇呼吸速率随贮藏时间的变化规律,结果表明,双孢蘑菇的呼吸速率随着贮藏时间的延长而不断降低,直至达到动态平衡状态,而且低温能够显著降低其呼吸强度。

(2) 利用 Langmuir 吸附理论对双孢蘑菇呼吸速率的测定值进行了解析,得到其呼吸速率模型。结果表明,基于 Langmuir 吸附理论的呼吸速率模型能够较准确地描述气调包装下双孢蘑菇的呼吸速率,且由模型可知,双孢蘑菇呼吸速率随贮藏环境中 O₂体积分数的增加而升高,随 CO₂体积分数的增加而降低;最大呼吸速率随温度的增加而增加,且与贮藏温度之间满足 Arrhenius 方程。该模型可为双孢蘑菇的气调包装设计提供理论依据。

参 考 文 献

1 石启龙,王相友,赵亚,等. 双孢蘑菇 MA 保鲜技术研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 144 ~ 147.
Shi Qilong, Wang Xiangyou, Zhao Ya, et al. Study on storage of mushroom under modified atmosphere[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 144 ~ 147. (in Chinese)

2 朱继英,王相友,许英超. 贮藏温度对双孢蘑菇采后生理和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 92 ~ 94.
Zhu Jiying, Wang Xiangyou, Xu Yingchao. Effects of storage temperature on the postharvest physiology and quality of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 92 ~ 94. (in Chinese)

3 阎瑞香,李宁,朱志强,等. 不同保鲜膜包装对双孢蘑菇采后贮藏品质影响[J]. 中国食用菌,2010, 29(4): 46 ~ 48, 51.
Yan Ruixiang, Li Ning, Zhu Zhiqiang, et al. Effect of different packing bags on storage quality of *Agaricus bisporus* [J]. Edible Fungi of China, 2010, 29(4): 46 ~ 48, 51. (in Chinese)

4 王娟,王相友,李霞. 低温气调贮藏下氧气含量对双孢蘑菇品质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 110 ~ 113, 123.
Wang Juan, Wang Xiangyou, Li Xia. Effects of oxygen concentration on storage quality of *Agaricus bisporus* under low temperature and controlled atmosphere storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 110 ~ 113, 123. (in Chinese)

- 5 张长峰. 气调包装条件下果蔬呼吸强度模型的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 281 ~ 285.
Zhang Changfeng. Research advances on respireation models in modified atmosphere packageing of fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 281 ~ 285. (in Chinese)
- 6 王相友, 李霞, 王娟, 等. 气调包装下果蔬呼吸速率研究进展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 94 ~ 99.
Wang Xiangyou, Li Xia, Wang Juan, et al. Advances of respiration rate in modified atmosphere packaging for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 94 ~ 99. (in Chinese)
- 7 王则金. 蘑菇低温气调保鲜的初步研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(4): 66 ~ 68.
Wang Zejin. Study on low-temperature and controlled atmosphere storage of mushrooms[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(4): 66 ~ 68. (in Chinese)
- 8 雷桥, 陈琼. 气调包装对蘑菇采后品质特性的影响[J]. 保鲜与加工, 2005, 5(1): 23 ~ 25.
Lei Qiao, Chen Qiong. Effects of modified atmosphere packaging on quality characteristics of mushrooms during cold storage [J]. Storage and Process, 2005, 5(1): 23 ~ 25. (in Chinese)
- 9 侯东明, 江亿. 水果蔬菜薄膜气调贮藏[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- 10 Makino Y, Iwasaki K, Hirata T. Oxygen consumption model for fresh produce on the basis of adsorption theory[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1996, 39(3): 1 067 ~ 1 073.
- 11 Sickevitz P. Mechanism of catalysis[M]. New York: Plenum Press, 1982: 126 ~ 129.
- 12 Alberts B. Molecular biology of the cell[M]. 3rd. New York: Garland Publishing, Inc. , 1994: 672 ~ 683.
- 13 Miller G W, Hsu W J. Effects of carbon dioxide-bicarbonate mixtures on oxidative phosphorylation by cauliflower mitochondria[J]. Biochemistry Journal, 1965, 97(3): 615 ~ 619.
- 14 Makino Y, Iwasaki K, Hirata T. A theoretical model for oxygen consumption in fresh produce under an atmosphere with carbon dioxide[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 65(3): 193 ~ 203.
- 15 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.
Xu Buqian, Yu Xiaolin. Measurement of respiration rate of fruits and vegetables in modified atmosphere packaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(5): 110 ~ 113. (in Chinese)
- 16 Fishman S, Rodov V, Peretz J, et al. Model for gas exchange dynamics in modified atmosphere packages of fruits and vegetables[J]. Journal of Food science, 1995, 60(5): 1078 ~ 1083.
- 17 田平海. 黄桃冷藏气调小包装呼吸速率模型与品质变化实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
Tian Pinghai. Studies on respireation rate and quality of modified atmosphere packaged yellow peach combined with cold storage[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003. (in Chinese)
- 18 王娟, 王相友, 李霞. 气调包装下双孢蘑菇呼吸特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 102 ~ 105.
Wang Juan, Wang Xiangyou, Li Xia. Respiration characteristics of *Agaricus bisporus* under modified atmosphere packaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 102 ~ 105. (in Chinese)