

# 双孢蘑菇采后贮藏品质预测模型\*

王相友 朱继英 李霞

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**【摘要】** 通过双孢蘑菇贮藏试验,研究不同温度和相对湿度对双孢蘑菇采后贮藏品质的影响,建立了动力学模型。当相对湿度为95%时,不同贮藏温度下双孢蘑菇失重率和硬度衰减率的回归模型分别为  $M = (1.3949 + 0.3519T)t$ ,  $F = (2.4153 - 0.0204T + 0.0225T^2)t$ 。贮藏温度为2℃时,不同相对湿度环境下双孢蘑菇失重率和硬度衰减率回归模型分别为  $M_r = (61.0605 - 124.8105R_H + 63.985R_H^2)t$ ,  $F_r = (9.6579 - 11.7530R_H + 4.2651R_H^2)t$ 。结果表明,所得模型基本能预测双孢蘑菇在贮藏过程中的失重率和硬度衰减率的变化。经试验验证,模型预测值与试验值吻合良好。

**关键词:** 双孢蘑菇 贮藏品质 预测模型

中图分类号: S646.1<sup>+</sup>1; S609<sup>+</sup>.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)06-0103-05

## Predictive Mathematical Model for Storage Quality of *Agaricus Bisporus*

Wang Xiangyou Zhu Jiying Li Xia

(School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

### Abstract

A storage test was carried out to evaluate the effects of temperature and relative humidity (RH) on the storage quality of *Agaricus bisporus*, and mathematical models were established. Models of the storage quality of *Agaricus bisporus* in terms of temperature were  $M = (1.3949 + 0.3519T)t$  and  $F = (2.4153 - 0.0204T + 0.0225T^2)t$ , which developed from the slopes of weight loss and firmness versus time for five temperatures (0, 3, 6, 9, 12℃) and 95% RH. Models of the storage quality of *Agaricus bisporus* in terms of RH were  $M_r = (61.0605 - 124.8105R_H + 63.985R_H^2)t$  and  $F_r = (9.6579 - 11.7530R_H + 4.2651R_H^2)t$ , which developed from the slopes of weight loss and firmness versus time for five relative humidity and 2℃. Study results suggested that, the quality deterioration of *Agaricus bisporus* during storage was well described by the obtained models, and agreed well with the experiment data. Results of the study can be applied to the storage of *Agaricus bisporus*.

**Key words** *Agaricus bisporus*, Storage quality, Predictive mathematical model

### 引言

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 含水率高,组织非常细嫩,菌盖表面没有明显的保护结构,常温下采后1~2 d 菇体内的水分就会大量蒸发散失,菌盖及菌褶开始破膜、开伞、失水、萎缩、褐变甚至腐烂,菌柄伸长,严重影响其贮藏寿命<sup>[1-2]</sup>。

许多研究表明,果蔬的贮藏品质是温度、时间、

相对湿度和气体组成的函数<sup>[3-6]</sup>。目前,国内外关于双孢蘑菇采后保鲜贮藏的研究较多<sup>[7-10]</sup>,但有关双孢蘑菇采后贮藏品质预测模型的研究鲜见报道。

本文通过双孢蘑菇贮藏试验,研究不同温度和相对湿度对双孢蘑菇采后品质的影响,并建立动力学模型以预测双孢蘑菇采后贮藏过程中失重率和硬度的变化,为双孢蘑菇采后贮藏保鲜提供理论参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料与方法

双孢蘑菇采自山东省淄博市临淄区边河镇南木北村,菌株为 F56。双孢蘑菇采后立即运至山东理工大学实验冷库,  $(2 \pm 1)^\circ\text{C}$  下预冷 20 h。再将预冷后的双孢蘑菇进行分拣,挑选菇体完整、颜色洁白、菇盖未开伞、子实体大小基本一致(直径 25 ~ 35 mm)、无病虫害和无机械伤的双孢蘑菇进行试验。

(1) 将双孢蘑菇置于温度分别为 0、3、6、9 和  $12^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(95 \pm 1)\%$  的恒温恒湿箱(可精确控制温度在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ) 中贮藏 8 d,于贮藏后的第 2、4、6、8 天取样测双孢蘑菇的失重率和硬度,每处理重复 3 次,每个处理的处理量为  $2000 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ ,研究温度对贮藏品质的影响。

(2) 将双孢蘑菇置于相对湿度分别为 70%、80%、90%、100%,温度为  $(2 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  的恒温恒湿箱(可精确控制相对湿度在  $\pm 1\%$ ) 中贮藏 8 d,于贮藏后的第 2、4、6、8 天取样测双孢蘑菇的失重率和硬度,每处理重复 3 次,每个处理的处理量为  $2000 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ ,研究相对湿度对贮藏品质的影响。

### 1.2 测定指标

#### 1.2.1 失重率

设贮藏前双孢蘑菇质量为  $m_1$ ,贮藏后双孢蘑菇质量为  $m_2$ ,则失重率为

$$L = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.2 硬度

用 GY-1 型果实硬度计测定。将双孢蘑菇切去表皮,然后将硬度计垂直于被测表面,取点距菇柄中心位置约 8 ~ 10 mm 处,在均匀力的作用下将压头压入子实体内 5 mm,以此时硬度计的读数作为双孢蘑菇的硬度。每个处理选取 4 个双孢蘑菇,取 9 个点测定其硬度,然后取其平均值。

### 1.3 品质降解的基本动力学模型

硬度和含水率是反映双孢蘑菇采后品质的重要指标。硬度主要由组织的细胞壁结构和细胞膨压决定,水分损失是由于双孢蘑菇组织内部和外界空气之间水势梯度和呼吸作用引起。据 Thai C N<sup>[11]</sup> 报道果蔬的品质(如硬度和颜色等)可以表示为贮藏时间和温度的函数,即

$$Q(t) = Q_0 + kt \quad (2)$$

式中  $Q(t)$ ——果蔬在任意时刻的品质

$Q_0$ ——果蔬的初始品质( $t=0$ )

$k$ ——与温度有关品质降解常数

$t$ ——贮藏时间

### 1.4 数据处理和模型拟合度分析

所有的数据用 Origin 5.0 软件进行统计处理。模型的拟合度通过平均相对百分比误差值来确定,其定义为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_e - V_p|}{V_e} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $V_e$ 、 $V_p$ ——试验的测试值和预测值

$N$ ——试验次数

如果  $P$  值小于 10%,则认为该模型的拟合度是可以接受的<sup>[12-13]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 不同温度处理下双孢蘑菇品质的变化

#### 2.1.1 失重率

图 1 为不同贮藏温度下双孢蘑菇失重率随贮藏时间的变化曲线。由图可知,双孢蘑菇在 5 种不同贮藏温度下,失重率  $M_T$  随时间  $t$  变化的回归方程分别为

$$M_{0^\circ\text{C}} = 8.1041t \quad (R = 0.9946)$$

$$M_{3^\circ\text{C}} = 2.6285t \quad (R = 0.9914)$$

$$M_{6^\circ\text{C}} = 3.3116t \quad (R = 0.9923)$$

$$M_{9^\circ\text{C}} = 4.4190t \quad (R = 0.9891)$$

$$M_{12^\circ\text{C}} = 5.7787t \quad (R = 0.9949)$$

其回归方程的相关系数均大于 0.98,说明试验数据与所得直线方程基本吻合。

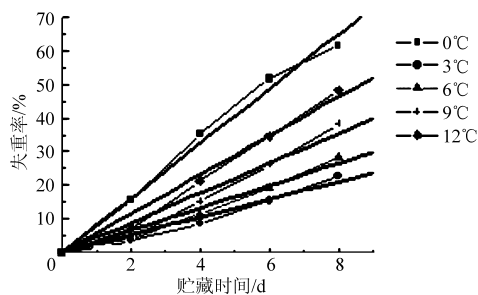


图 1 不同贮藏温度下双孢蘑菇失重率随贮藏时间的变化曲线

Fig. 1 Changes in weight loss of *Agaricus bisporus* vs storage time at different temperatures

#### 2.1.2 硬度衰减率

图 2 为不同贮藏温度下双孢蘑菇硬度衰减率随贮藏时间的变化曲线。由图可知,双孢蘑菇在 4 种不同贮藏温度下,硬度衰减率  $F_T$  随时间  $t$  变化的回归方程分别为

$$F_{3^\circ\text{C}} = 2.8831t \quad (R = 0.9636)$$

$$F_{6^\circ\text{C}} = 4.2676t \quad (R = 0.9958)$$

$$F_{9^\circ\text{C}} = 5.3306t \quad (R = 0.9942)$$

$$F_{12^\circ\text{C}} = 7.1293t \quad (R = 0.9914)$$

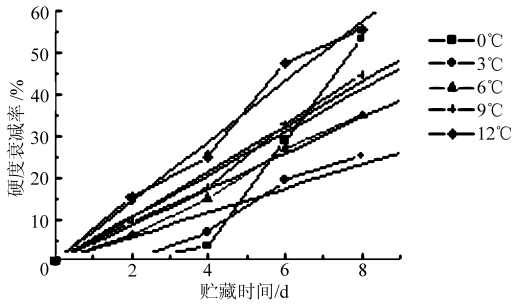


图 2 不同贮藏温度下双孢蘑菇硬度衰减率随贮藏时间的变化曲线

Fig. 2 Changes in firmness of *Agaricus bisporus* vs storage time at different temperatures

0℃时的试验值所得出的图形基本上不满足线性关系,主要是因为双孢蘑菇在 0℃时出现冷害,品质迅速下降,另外试验点减少也是一部分原因。可以认为出现冷害的双孢蘑菇贮藏过程中品质的变化不满足线性相关。其他温度处理下得回归方程的相关系数均大于 0.96,说明试验数据与所得直线方程基本吻合。

## 2.2 不同相对湿度处理下双孢蘑菇品质的变化

### 2.2.1 失重率

图 3 为不同相对湿度下双孢蘑菇失重率随贮藏时间的变化曲线。由图可知,双孢蘑菇在 4 种不同相对湿度下,失重率  $M_{RH}$  随时间  $t$  变化的回归方程分别为

$$M_{70\%} = 5.0974t \quad (R = 0.9962)$$

$$M_{80\%} = 2.0077t \quad (R = 0.9985)$$

$$M_{90\%} = 0.7137t \quad (R = 0.9668)$$

$$M_{100\%} = 0.1834t \quad (R = 0.9811)$$

其回归方程的相关系数均大于 0.96,说明试验数据与所得直线方程基本吻合。

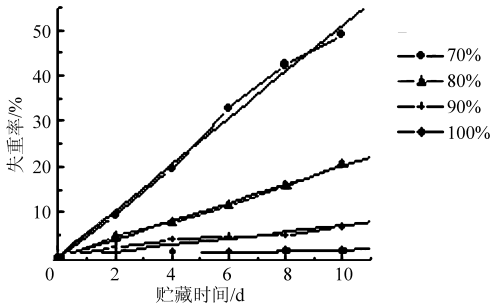


图 3 不同相对湿度下双孢蘑菇失重率随贮藏时间的变化曲线

Fig. 3 Changes in weight loss of *Agaricus bisporus* vs storage time at different relative humidity

### 2.2.2 硬度衰减率

图 4 为不同相对湿度下双孢蘑菇硬度衰减率随贮藏时间的变化曲线。由图可知,双孢蘑菇在 4 种

不同相对湿度下贮藏,硬度衰减率  $F_{RH}$  随时间  $t$  变化的回归方程分别为

$$F_{70\%} = 3.5401t \quad (R = 0.9775)$$

$$F_{80\%} = 2.9272t \quad (R = 0.9750)$$

$$F_{90\%} = 2.5930t \quad (R = 0.9947)$$

$$F_{100\%} = 2.1507t \quad (R = 0.9859)$$

不同相对湿度处理下的双孢蘑菇的硬度衰减率随时间的变化呈线性关系,回归方程的相关系数均大于 0.97。

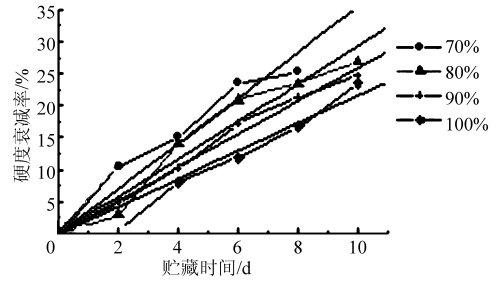


图 4 不同相对湿度下双孢蘑菇硬度衰减率随贮藏时间的变化曲线

Fig. 4 Changes in firmness of *Agaricus bisporus* vs storage time at different relative humidity

## 2.3 品质模型的建立

### 2.3.1 不同温度处理下双孢蘑菇的品质模型

将图 1 中的 4 个回归方程的斜率 (2.6285、3.3116、4.4190、5.7787) 与其对应的温度 (3℃、6℃、9℃、12℃) 作图可得失重率与温度的关系如图 5 所示,回归方程呈线性,其回归方程为  $M = 1.3949 + 0.3519T$ ,相关系数为  $R = 0.9898$ 。

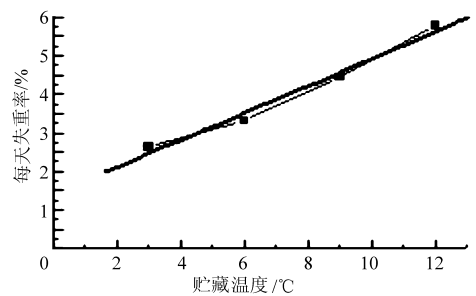


图 5 双孢蘑菇失重率与温度的关系曲线

Fig. 5 Relationship between rate of weight loss and temperature

将图 2 中的 4 个回归方程的斜率 (2.8831、4.2676、5.3306、7.1293) 与其对应的温度 (3℃、6℃、9℃、12℃) 作图可得硬度衰减率与温度的关系如图 6 所示,回归方程呈二次函数形式,其回归方程为  $F = 2.4153 - 0.0204T + 0.0225T^2$ ,相关系数为  $R = 0.9806$ 。

失重率的通用方程可以表示为

$$M = k_m t \quad (4)$$

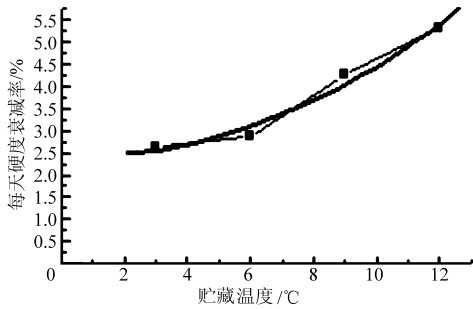


图6 双孢蘑菇硬度衰减率与温度的关系曲线  
Fig.6 Relationship between rate of firmness loss and temperature

式中  $k_m$ ——失重率变化速率

用图5中回归方程代替式(4)中  $k_m$  可得到每天失重率与时间和温度的关系为

$$M = (1.3949 + 0.3519T)t \quad (5)$$

式中  $T$ ——贮藏温度, °C

同理, 硬度衰减率的通用方程可以表示为

$$F = k_f t \quad (6)$$

式中  $k_f$ ——硬度的衰减率变化速率

用图6中回归方程代替式(6)中  $k_f$  可得到硬度衰减率与时间和温度的关系为

$$F = (2.4153 - 0.0204T + 0.0225T^2)t \quad (7)$$

式(5)和式(7)模拟了在不同温度下贮藏的双孢蘑菇的失重率和硬度衰减率的变化。由式(5)可以看出, 失重率与温度和时间均呈线性相关。从式(7)可以看出, 硬度衰减率与温度呈二次函数相关, 与时间是线性相关。

### 2.3.2 不同相对湿度处理下双孢蘑菇的品质模型

将图3中的4个回归方程的斜率(5.0974、2.0077、0.7137、0.1834)与其对应的相对湿度(70%、80%、90%、100%)作图可得每天失重率与相对湿度的关系如图7所示, 其回归方程为  $M_r = 61.0605 - 124.8105R_H + 63.985R_H^2$ , 相关系数  $R = 0.99634$ , 式中  $R_H$  为相对湿度(%)。

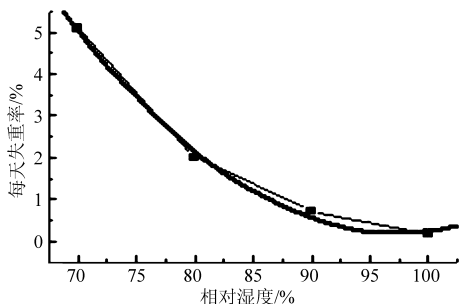


图7 双孢蘑菇失重率与相对湿度的关系曲线  
Fig.7 Relationship between rate of weight loss and relative humidity

将图4的4个回归方程的斜率(3.5401、2.9272、2.5930、2.1507)与其对应的相对湿度(70%、80%、

90%、100%)作图可得硬度衰减率与相对湿度的关系如图8所示, 回归方程呈指数形式, 其回归方程为  $F_r = 9.6579 - 11.7530R_H + 4.2651R_H^2$ , 相关系数  $R = 0.9927$ 。

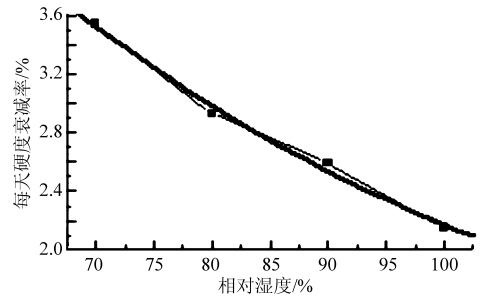


图8 双孢蘑菇硬度衰减率与相对湿度的关系曲线  
Fig.8 Relationship between rate of firmness loss and humidity

用图7中回归方程代替式(4)中  $k_m$  可得到每天失重率与时间和相对湿度的关系为

$$M_r = (61.0605 - 124.8105R_H + 63.985R_H^2)t \quad (8)$$

同理, 用图8中回归方程代替式(6)中  $k_f$  可得到每天硬度衰减率与时间和相对湿度的关系为

$$F_r = (9.6579 - 11.7530R_H + 4.2651R_H^2)t \quad (9)$$

式(8)和式(9)模拟了在不同相对湿度下贮藏的双孢蘑菇的失重率和硬度衰减率的变化。可以看出, 硬度衰减率和失重率与相对湿度都是呈二次函数关系, 与时间都是线性相关的。

### 2.4 模型的验证

将双孢蘑菇分别放在温度为2°C的环境中作温度验证试验和相对湿度为95%的大气环境中做相对湿度验证试验。试验结果如图9~12所示。

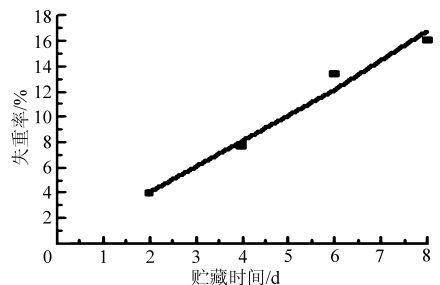


图9 2°C下失重率试验与模型预测结果比较  
Fig.9 Validation of the weight loss model under 2°C

由图9~12可以看出, 双孢蘑菇的失重率和硬度衰减率在贮藏期的试验结果与模型预测结果基本吻合( $P_M = 5.62\% < 10\%$ ,  $P_M = 4.95\% < 10\%$ ;  $P_F = 3.54\% < 10\%$ ,  $P_F = 3.16\% < 10\%$ )。

双孢蘑菇在贮藏期间硬度和失重率都受温度和相对湿度影响很大, 分别取决于温度对细胞降解酶的活性与果实蒸腾作用的影响和相对湿度对果实蒸腾作用的影响。

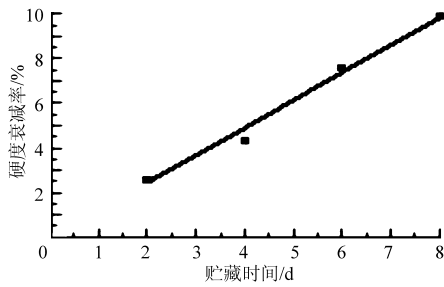


图 10 2℃下硬度衰减率试验与模型预测结果比较

Fig. 10 Validation of the firmness loss model under 2℃

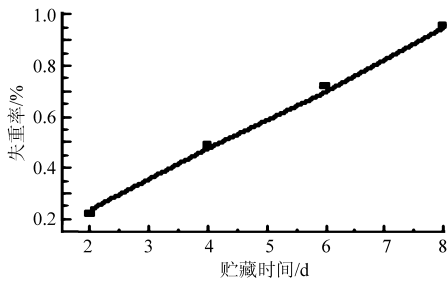


图 11 95%相对湿度下失重率试验与模型预测结果比较

Fig. 11 Validation of the weight loss model under 95% RH

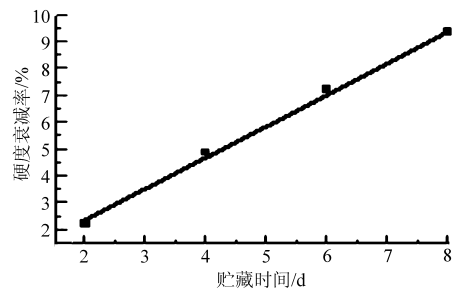


图 12 95%相对湿度下硬度衰减率试验与预测结果比较

Fig. 12 Validation of the firmness loss model under 95% RH

减率之间的动力学模型,分别为  $M = (1.3949 + 0.3519T)t$  和  $F = (2.4153 - 0.0204T + 0.0225T^2)t$ ,经模型预测结果与试验结果吻合良好。

(2) 建立了双孢蘑菇的相对湿度与失重率和硬度衰减率之间的动力学模型,分别为  $M_r = (61.0605 - 124.8105R_H + 63.985R_H^2)t$  和  $F_r = (9.6579 - 11.7530R_H + 4.2651R_H^2)t$ ,模型预测结果与试验结果吻合良好。

### 3 结论

(1) 建立了双孢蘑菇的温度与失重率和硬度衰

#### 参 考 文 献

- 王娟. 双孢蘑菇采后生理及其贮藏保鲜技术的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2004.  
Wang Juan. Study on postharvest physiology and preservation technology of mushroom[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 朱继英. 双孢蘑菇采后褐变机理及气调保鲜技术研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2006.  
Zhu Jiying. Mechanism of postharvest browning and techniques of controlled atmosphere storage for *Agaricus bisporus*[D]. Harbin: Northeast Agriculture University, 2006. (in Chinese)
- 王义华,徐梅珍,江萍,等. 酵母蛋白多糖的分离纯化及鉴定[J]. 微生物学报,2004,44(4):515~518.  
Wang Yihua, Xu Meizhen, Jiang Ping, et al. Purification and analysis of yeast polysaccharides[J]. Acta Microbiology Sinica, 2004, 44(4):515~518. (in Chinese)
- 张艳芳,王明杰. 葡萄酒中酒石酸钙稳定性探讨[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2001(6):48~50.  
Zhang Yanfang, Wang Mingjie. Approach on calcium tartrate stability in wine[J]. Sino-overseas Grapevine & Wine, 2001(6):48~50. (in Chinese)
- Guillouxbenatier M, Guerreau J, Feuillat M. Influence of initial colloid content on yeast macromolecule production and on the metabolism of wine microorganisms[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 1995, 46(4):486~492.
- Dupin IV S, McKinnon B M, Boulay R C, et al. *Saccharomyces cerevisiae* mannoproteins that protect wine from protein haze: their release during fermentation and lees contact and a proposal for their mechanism of action[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2010, 48(8):3098~3105.
- 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)
- Deepak R R, Shashi P. Transient state in-pack respiration rates of mushroom under modified atmosphere packaging based on enzyme kinetics[J]. Postharvest Technology, 2007, 98(12):319~326.
- Villaescusa R, Gill M I. Quality improvement of peurotus mushrooms by modified atmosphere packaging and moisture absorbers[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(4):69~79.

- Hu Guifang, Li Yun, Li Deping. Changes of maximum and minimum temperature for recent 100 years in Shandong province [J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(11): 43 ~ 46. (in Chinese)
- 13 杨三序, 李晓伟, 王业正. 电容传感器测量电路的温度补偿[J]. *传感器与微系统*, 2007, 6(7): 64 ~ 66.  
Yang Sanxu, Li Xiaowei, Wang Yezheng. Temperature compensation of capacitance transducer measuring circuit [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 6(7): 64 ~ 66. (in Chinese)
- 14 胡小松, 肖华志, 王晓霞. 苹果  $\alpha$ -法尼烯和共轭三烯含量变化与贮藏温度的关系[J]. *园艺学报*, 2004, 31(12): 169 ~ 172.  
Hu Xiaosong, Xiao Huazhi, Wang Xiaoxia. Contents of  $\alpha$ -farnesene and conjugated trienes in apple superficial scald and their relation with storage temperature [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(12): 169 ~ 172. (in Chinese)
- 15 张道辉, 贾发江, 杨娟侠, 等. 保鲜贮藏通用温控仪表的温度漂移及检测方法[J]. *落叶果树*, 2004, 36(1): 36 ~ 38.  
Zhang Daohui, Jia Fajiang, Yang Juanxia, et al. Fresh-keeping storage, the temperature drift of common temperature-controlling instruments and detection methods [J]. *Delicious Fruit*, 2004, 36(1): 36 ~ 38. (in Chinese)
- 16 张全庄, 张建平. 传感器测量误差补偿方法[J]. *电子测量技术*, 2007, 30(12): 119 ~ 129.  
Zhang Quanzhuang, Zhang Jianping. Methods of error compensation in sensor measuring [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(12): 119 ~ 129. (in Chinese)
- 17 徐斌, 胡振武, 黄蕾, 等. 小型冷库制冷系统稳态仿真[J]. *制冷与空调*, 2005, 5(5): 46 ~ 49.  
Xu Bin, Hu Zhenwu, Huang Lei, et al. Steady-state simulation of mini-type refrigeration warehouse system [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2005, 5(5): 46 ~ 49. (in Chinese)
- 18 陈磊, 李萌, 张润曦, 等. 一种带输出缓冲的低温度系数带隙基准电路[J]. *电子器件*, 2008, 31(3): 820 ~ 824.  
Chen Lei, Li Meng, Zhang Runxi, et al. A low temperature coefficient bandgap voltage reference with output buffer [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(3): 820 ~ 824. (in Chinese)
- 19 张道辉, 鲁墨森, 王大明, 等. 电子测控仪器标准信号输出装置: 中国, ZL00247521.9 [P]. 2001-05-16.  
Zhang Daohui, Lu Mosen, Wang Taiming, et al. Standards signal output apparatus for electronic monitoring and controlling system: CN, ZL00247521.9 [P]. 2001-05-16. (in Chinese)
- 20 林海军, 滕召胜, 杨圣洁, 等. 数字温度传感器自适应动态补偿方法[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(1): 138 ~ 142.  
Lin Haijun, Teng Zhaosheng, Yang Shengjie, et al. Adaptive dynamic compensation method for digital temperature sensors [J]. *Chinese Journal Scientific Instrument*, 2009, 30(1): 138 ~ 142. (in Chinese)

(上接第 107 页)

- 10 Ki M K, Jung A K, Jin S L, et al. Effect of modified atmosphere packaging on the shelf-life of coated, whole and sliced mushrooms [J]. *Swiss Society of Food Science and Technology*, 2006, 39(6): 364 ~ 371.
- 11 Thai C N, Shewfelt F L, Garner J C. Tomato color changes under constant and variable storage temperatures; empirical models [J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(2): 607 ~ 614.
- 12 Boquet R, Chirfe J, Iglesias H A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods; II. evaluation of various two-parameter models [J]. *Journal of Food Technology*, 1978, 13(3): 319 ~ 327.
- 13 Kaymak-Ertekin F, Gedik A. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apricots, apples and potatoes [J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2004, 37(4): 429 ~ 438.