

火柿果实采后电学特性研究

周永洪^a,黄 森^b,张继澍^a,王瑞庆^a

(西北农林科技大学 ^a 生命科学学院, ^b 理学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**了解火柿果实的电学特性,探讨利用电学特性进行无损检测的可行性。**【方法】**以火柿果实为材料,研究其成熟衰老过程中,当电场频率为 $100\sim4\times10^6$ Hz 时,复阻抗、相对介电常数、并联等效电感、电导率等电学参数的变化情况。**【结果】**随着频率的增加,火柿果实的复阻抗和并联等效电感下降,电导率逐渐上升,相对介电常数和介电损失呈波状变化。在所测频率范围内,随贮藏时间的延长,果实复阻抗、并联等效电感下降,而相对介电常数、介电损失和电导率上升。**【结论】** 10^6 Hz 可作为火柿果实无损检测特征频率,在此频率下,衰老火柿果实的相对介电常数是刚采摘果实的 3.5 倍。

[关键词] 火柿果实;介电特性;介电常数;无损检测

[中图分类号] S183 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2008)04-0117-06

Study on the post-harvest dielectric properties of persimmon fruit

ZHOU Yong-hong^a,HUANG Sen^b,ZHANG Ji-shu^a,WANG Rui-qing^a

(*a College of Life Sciences, b College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: **【Objective】** Dielectric properties of persimmon were studied in order to find the possibility of non-destructive testing using dielectric properties. **【Method】** Dielectric properties including impedance, dielectric constant, inductance in parallel equivalent circuit mode and conductivity etc. of persimmon fruit were investigated over a frequency range from 100 Hz to 4 MHz at room temperature. **【Result】** Both impedance and inductance in parallel equivalent circuit mode of persimmon fruit decreased with increasing frequency at room temperature, but conductivity of persimmon fruit increased. Both dielectric constant and loss factor had a peak at 1 MHz. It was also found that both impedance and inductance in parallel equivalent circuit mode of persimmon fruit decreased with prolonging period of shelf life at room temperature at constant frequency, but conductivity, dielectric constant and loss factor increased. **【Conclusion】** A characteristic frequency for nondestructive measurement of persimmon fruit is 1 MHz where dielectric constant of senile persimmon fruit is 3.5 times more than that of fresh one.

Key words: persimmon fruit; dielectric property; dielectric constant; non-destructive testing

果实无损检测是在不破坏果实的情况下,对果实品质进行评价的一种方法,这种方法有利于实现果实品质的在线分级,具有广泛的应用前景。果实无损检测技术主要是利用果实的物理性质,如力学、热学、电学、光学和声学等对果实品质进行检测,其中,利用果实电学性质进行果实品质检测,是近年来发展的一个新领域^[1]。

果实属于电介质,其介电特性是指内部分子中

* [收稿日期] 2007-04-19
[基金项目] 国家自然科学基金项目(30471001)
[作者简介] 周永洪(1981—),男,壮族,广西柳州人,在读硕士,主要从事果实采后生理和无损检测研究。
E-mail:zhouyonghong81@163.com
[通讯作者] 黄 森(1954—),男,陕西宝鸡人,副教授,硕士,硕士生导师,主要从事果实采后生理研究。
E-mail:xnhuangs@vip.163.com

的束缚电荷(只能在分子线度范围内运动的电荷)对外加电场的响应特性^[1]。目前,国内外在该领域的研究已经取得了一定成果。Kato^[2]发现,在 10 Hz~13 MHz,受损水果的串、并联等效电阻和阻抗值低于正常水果,而串联等效电容和损耗因数高于正常水果;张立彬等^[3]、胥芳等^[4-5]和柯大观等^[6]研究发现,苹果和桃的储藏时间越长,其相对介电常数和介质损耗因数越小;郭文川等^[7]研究发现,苹果相对介电常数在贮藏初期上升,在贮藏后期迅速下降;叶齐政等^[8]提出根据水果阻抗的特征频率变化测定采后水果成熟度的方法,并在以芒果为试材的检验中取得了很好的效果,但该方法必须将水果浸泡在水中进行测试;Wang 等^[9]研究表明,20 ℃下,当频率为 $2.7\times10^7\sim1.8\times10^9$ Hz 时,蛇果、葡萄柚、柑桔等水果的介电常数随频率增加略有降低;Nelson^[10]研究发现,当频率为 $10^8\sim10^{10}$ Hz 时,随着‘dixired’桃(*Prunus persica* L.)成熟度的增加,其相对介电常数减小,介质损耗因数变化不明显。

在我国,柿果的产量仅次于苹果、柑橘、梨、香蕉和葡萄,位居第六位^[11],柿果采后生理生化变化的研究已相对清楚^[12-13],但对其采后电学特性的研究尚未见相关报道。本试验以火柿果实为材料,研究了不同贮藏时期火柿果实的相对介电常数、介电损失、电导率、并联等效电感、复阻抗及其实部、虚部等电学指标的频率特征,以期探寻评价火柿品质的合理指标及与之对应的频率范围,为果实无损检测奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材 料

火柿(*Diospyros kaki* L. huoshi)于 2006-09-21 采自陕西省乾县吴店乡齐南村西北农林科技大学黄土高原试验站,当天运回实验室,挑选大小均匀、无损伤、无病虫害、果色由绿转黄、果顶未转红的果实作为试验用果,室温((20±1) ℃)下贮藏至软化,分别于 0,7,14,21 d 进行电学指标和品质指标的测定,设 3 个重复,每重复 10 个果实。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 电学指标的测定 火柿果实介电特性的测试系统由日本日置 3532-50 LCR 测试仪和计算机组成,二者以 RS-232C 串行接口为通信通道相连接,通过串口线,借助配套软件,在计算机上对测试仪进行参数设定,在线自动测量电学参数,并接收采集到的数据。测试探头为 9140 型 4 终端探头,电极采用

铜制正方形平板电极,上下极板边长均为 6 cm。用平行平板电极夹住火柿果实颊部测定复阻抗模(|Z|)、电导(G)、电导率(σ)、并联等效电容(C_p)和并联等效电感(L_p)等电学参数。测试电源电信号采用频率为 100~4×10⁶ Hz、电压为 1 V 的正弦波。极板夹持力为 3 N。

1.2.2 品质指标和丙二醛含量的测定 硬度采用果实硬度计(意大利 FT-327,探头直径为 10 mm)测定。可溶性固形物含量用手持折光仪(WYT-4)测定。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定^[14]。

2 结果与分析

2.1 火柿果实采后复阻抗(Z)的变化

不同贮藏时期火柿果实复阻抗模|Z|的测定结果(复阻抗模和频率(f)均取对数)如图 1 所示。

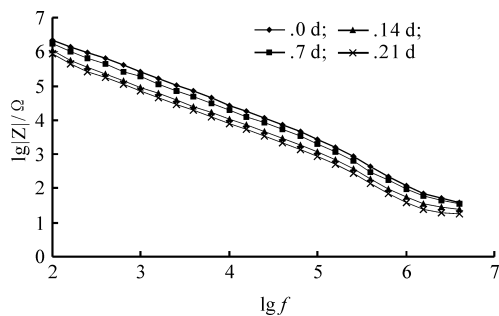


图 1 室温下不同贮藏时期火柿果实复阻抗模随频率的变化

Fig. 1 Variation of impedance of persimmon fruit at different shelf lives with frequency at room temperature

从图 1 可以看出,不同贮藏时期火柿果实的 $\lg|Z|$ 值随频率增加而减小,由 100 Hz 频率下 $\lg|Z|$ 值大于 6 减小到 4×10^6 Hz 频率下 $\lg|Z|$ 值小于 2。在同一频率下,贮藏时间越长的果实 $\lg|Z|$ 值越小,即火柿复阻抗模随贮藏时间的延长是逐渐减小的。例如,当频率为 10^4 Hz 时,贮藏 0,7,14,21 d 火柿果实的复阻抗模分别是 $2.75\times10^4, 1.98\times10^4, 1.09\times10^4, 8.16\times10^3 \Omega$ 。图 1 也显示,贮藏 0,7,14,21 d 时,火柿果实 $\lg|Z|$ 要达到相同的值所需的频率依次减小,即随着火柿果实成熟度的增加,复阻抗模曲线向低频漂移。通过线性拟合发现,不同贮藏时期火柿果实 $\lg|Z|$ 与 $\lg f$ 均有很好的线性关系,斜率为 $-1.02\sim-1.06$, R^2 均大于 0.99,可以等价于理想电容器^[15-16](斜率为-1),二者有如下关系:

$$\lg|Z| = -\lg f - \lg C_{td} \quad (1)$$

式中: C_{bl} 为势垒电容,可以反映介电物质的特性。当 $f=1$ 时, $\lg|Z|=-\lg C_{bl}$,由图 1 可以求出不同贮藏时期火柿果实的势垒电容 C_{bl} ,贮藏 0,7,14 和 21 d 时火柿果实的 C_{bl} 分别为 2.51,4.00,8.10 和 9.86 nF,可见 C_{bl} 值随贮藏时间的增加而增大。

复阻抗 $Z(\omega)=Z'(\omega)-jZ''(\omega)$,复阻抗实部 $Z'(\omega)$ 和虚部 $Z''(\omega)$ 可以通过以下公式计算^[17-18]:

$$Z'(\omega)=G/(G^2+\omega^2C_p^2), \tag{2}$$

$$Z''(\omega)=C_p\omega/(G^2+\omega^2C_p^2)。 \tag{3}$$

式中: G 和 C_p 分别为电导和并联等效电容, ω 为角频率, $\omega=2\pi f$ 。

图 2 显示,当频率为 $100\sim10^4$ Hz 时,复阻抗实

部对数 $\lg Z'$ 随频率的增加和贮藏时间的延长而减小,并且曲线随频率的增加而逐渐合并;在 10^5 Hz 附近, $\lg Z'$ 有 1 个峰,峰没有随贮藏时间和频率的变化而发生漂移;且频率为 10^5 Hz 时,可以明显看出,贮藏时间长的果实 $\lg Z'$ 值较贮藏时间短的果实小。

图 3 显示,室温下不同贮藏时期火柿果实复阻抗虚部随频率的变化规律与复阻抗模相似,即 $\lg Z''$ 与 $\lg f$ 呈线性变化, $\lg Z''$ 随频率的增加和贮藏时间的延长而减小。例如,当频率为 10^4 Hz 时,贮藏 0,7,14,21 d 火柿果实复阻抗虚部分别是 2.73×10^4 , 1.93×10^4 , 1.04×10^4 , $6.64\times10^3\ \Omega$,21 d 火柿果实复阻抗虚部仅为 0 d 的 24.3%。

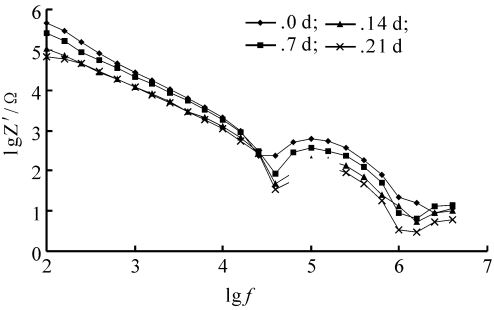


图 2 室温下不同贮藏时期火柿果实复阻抗实部随频率的变化

Fig. 2 Variation of real part of impedance of persimmon fruit at different shelf lives with frequency at room temperature

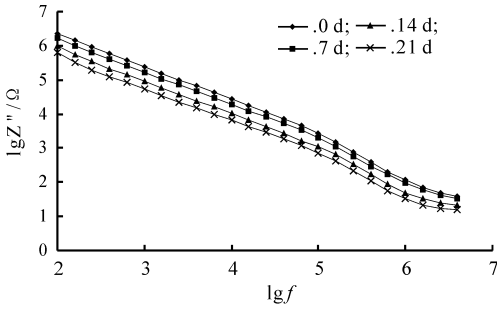


图 3 室温下不同贮藏时期火柿果实复阻抗虚部随频率的变化

Fig. 3 Variation of imaginary part of impedance of persimmon fruit at different shelf lives with frequency at room temperature

2.2 火柿果实采后介电特性的变化

复介电常数 $\epsilon^*(\omega)=\epsilon'(\omega)-j\epsilon''(\omega)$,其中实部 $\epsilon'(\omega)$ 和虚部 $\epsilon''(\omega)$ 分别是相对介电常数和介电损失,二者可以通过测定并联等效电容 C_p 和电导 G 来计算,公式^[17]如下:

$$\epsilon'(\omega)=C_p d/\epsilon_0 A, \tag{4}$$

$$\epsilon''(\omega)=G d/\epsilon_0 A \omega。 \tag{5}$$

式中: A 为平行电极的面积, d 为电极之间的距离(即样品厚度),真空介电常数 $\epsilon_0=8.86\times10^{-12}$ F/m。

图 4 表示的是相对介电常数 $\epsilon'(\omega)$ 随频率的变化。

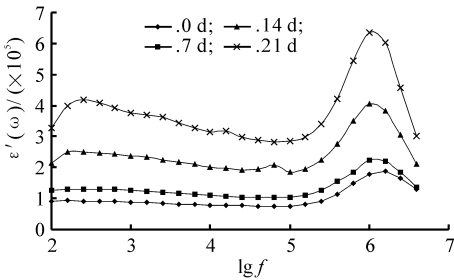


图 4 室温下不同贮藏时期火柿果实相对介电常数随频率的变化

Fig. 4 Variation of dielectric constant of persimmon fruit at different shelf life with frequency at room temperature

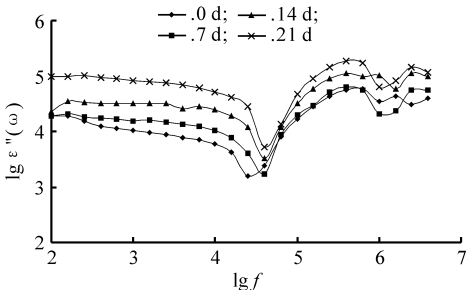


图 5 室温下不同贮藏时期火柿果实介电损失随频率的变化

Fig. 5 Variation of loss factor of persimmon fruit at different shelf life with frequency at room temperature

从图 4 可以看出,当频率为 $100\sim 10^5$ Hz 时,贮藏 0 和 7 d 火柿果实的 $\epsilon'(\omega)$ 值分别保持在一定水平上,贮藏 14 和 21 d 火柿果实 在 251 Hz 处有一小峰,在峰右侧是逐渐下降的;当频率为 $10^5\sim 4\times 10^6$ Hz 时,不同贮藏时期火柿果实 $\epsilon'(\omega)$ 在频率约为 10^6 Hz 有 1 个峰值。在所测频段的同一频率下, $\epsilon'(\omega)$ 随果实贮藏时间的增加而增大,而且在贮藏后期, $\epsilon'(\omega)$ 值增加趋势更加明显。当频率为 10^6 Hz 时,相对介电常数出现峰值,且随贮藏时间的增加而增加尤其明显,21 d 火柿果实的相对介电常数是 0 d 的 3.5 倍,故将此时的频率作为火柿果实无损检测的特征频率。

图 5 显示,介电损失 $\epsilon''(\omega)$ 随频率的变化较复杂。当频率为 $100\sim 10^4$ Hz 时,不同贮藏时期火柿果实的 $\epsilon''(\omega)$ 值缓慢减小;当频率为 4×10^4 Hz 和 4×10^5 Hz 时, $\epsilon''(\omega)$ 值分别有最小值和最大值;当频率大于 4×10^5 Hz 时, $\epsilon''(\omega)$ 值波动较大。

2.3 火柿果实采后电导率(σ)与并联等效电感(L_p)的变化

不同贮藏时期火柿果实电导率 σ 随频率的变化如图 6 所示。图 6 显示, σ 值基本随频率增加而增大。当频率为 $200\sim 2\times 10^4$ Hz 时, $\lg \sigma$ 与 $\lg f$ 呈线性关系;在同一频率下, $\lg \sigma$ 随贮藏时间的延长而增大。以 10^4 Hz 为例,贮藏 0, 7, 14, 21 d, 火柿果实 σ 值分别为 3.28×10^{-5} , 5.85×10^{-5} , 1.35×10^{-4} , 2.88×10^{-4} S/m。当频率为 $4\times 10^5\sim 4\times 10^6$ Hz 时,不同贮藏时期 σ 值有较大波动。

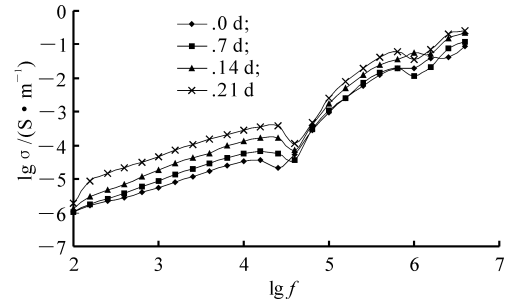


图 6 室温下不同贮藏时期火柿果实电导率随频率的变化

Fig. 6 Variation of conductivity of persimmon fruit at different shelf lives with frequency at room temperature

图 7 显示,当频率为 $100\sim 4\times 10^6$ Hz 时,不同贮藏时间火柿果实的并联等效电感的变化规律与复阻抗模相似,即并联等效电感随频率的增加而降低, $\lg L_p$ 与 $\lg f$ 呈线性关系,在所测频率范围的同一频

率下, $\lg L_p$ 随贮藏时间的延长而逐渐减小。

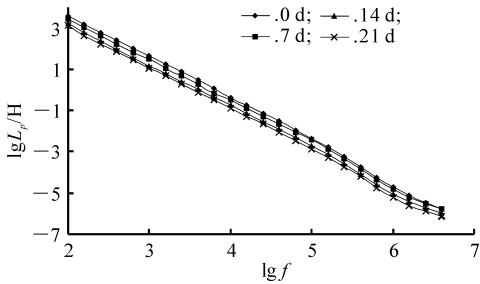


图 7 室温下不同贮藏时期火柿果实并联等效电感随频率的变化

Fig. 7 Variation of inductance in parallel equivalent circuit mode of persimmon fruit at different shelf lives with frequency at room temperature

2.4 火柿果实采后品质指标和 MDA 含量的变化

硬度是衡量柿果实耐贮性的重要指标。由表 1 可以看出,火柿果实采后硬度下降非常迅速,21 d 内硬度由 9.69 kg/cm^2 下降到 1.16 kg/cm^2 。可溶性固形物含量是决定果实品质和风味的重要因素之一。表 1 显示,随贮藏时间的延长,可溶性固形物含量持续下降,表明随着火柿果实衰老软化,可溶性单宁不断转化为不溶性单宁;火柿果实采后丙二醛含量不断增加,采后 21 d 时丙二醛含量是 0 d 的 3.86 倍,表明随着贮藏期的延长,火柿果实细胞膜破坏程度不断加剧。

表 1 室温下不同贮藏时期火柿果实品质指标和丙二醛(MDA)含量的变化

Table 1 Variation of quality index of persimmon fruit after harvest			
贮藏时间/d Days after harvest	硬度/ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) Firmness	可溶性固形物/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) Soluble solids content	丙二醛含量/ ($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$) Content of MDA
0	9.69	212	0.07
7	4.26	193	0.13
14	2.15	185	0.16
21	1.16	163	0.27

3 讨论

本研究中,火柿果实复阻抗模的变化趋势与叶齐政等^[8]以番茄和芒果为试材所得结果类似,即随着频率增加复阻抗模降低,而且随着火柿果实成熟度的增加复阻抗模曲线发生漂移,这可能是由不同成熟度果实的松弛时间 τ 不同引起的。但本试验中未观测到叶齐政等所述的特征频率,这可能与本试验所用仪器不同和测试频率点较疏有关。

本研究中,复阻抗虚部和并联等效电感与复阻

抗模变化规律相似,即随着频率增大,3个参数均减小,而且三者的对数与频率对数呈线性关系,各个时期火柿果实电学参数的拟合曲线斜率相同,但截距不同,表明随着成熟度变化,拟合曲线发生漂移,这种漂移导致相同频率下,果实电学参数值随成熟度增加而减小;此外,曲线漂移方向一致,均向低频漂移,说明引起三者变化的机理可能相同。

本研究中,一定频率下,随着贮藏时间的延长,火柿果实电导率总体上呈增加趋势,表明成熟度越大的果实导电性越好。果实组织中对导电性影响最大的因素是果实中的电解质^[19],可能由于成熟度大的果实果肉细胞膜破坏更严重,被细胞膜区隔的内外电解质之间的流动性增强,导致导电性增强,表现为导电率增加,该趋势与丙二醛含量增加所反映的细胞膜破坏程度加剧一致。

本研究中,相对介电常数和介电损失均随频率变化呈波动状变化。随果实成熟度增加,二者均增大,到贮藏后期,相对介电常数增加趋势更明显。该结果与郭文川等^[7]以苹果为试材所得结果部分相似,区别在于本试验所得相对介电常数在贮藏后期没有迅速降低,这可能与试验材料不同有关。本研究中,随果实成熟度增加,相对介电常数与丙二醛含量的增加趋势一致,说明在所选频率范围内,引起火柿相对介电常数变化的主导因素可能是细胞膜被破坏导致导电性增强。

本研究结果表明,火柿果实在电场中的电学特性与电场频率密切相关,因为在电场中分子存在各种不同的极化类型^[20](偶极、跳跃电子、极化子、离子),各种极化类型与频率密切相关,当频率由低频逐渐转向高频,果实内部分子极化程度发生改变,极化类型可能发生变化,从而表现为电学指标的改变。火柿果实在电场中的电学特性与果实成熟衰老也密切相关,因为果实内部结构和成分非常复杂,包括了各种几何构造和物理性质不同的系统(晶体、聚合物、细胞膜、生物电解质),由于不同分子的松弛时间各不相同,当这些系统的结构和分布发生变化时,电学参数也随之改变,即果实成熟度与电学参数变化趋势相关,本试验结果也证实了这一点。

4 结 论

火柿果实电学参数的变化与电场频率和果实成熟度密切相关。

由电场频率变化引起的果实电学参数的变化反映了果实对电场频率的响应特性,这是利用电学特

性测定果实品质的基础。

在相同频率下,随火柿果实贮藏时间的延长,果实成熟度增加,果实的复阻抗模、并联等效电感下降,相对介电常数、介电损失和电导率上升。

[参考文献]

- [1] 应义斌,韩冬海.农产品无损检测技术[M].北京:化学工业出版社,2005:152-163.
Ying Y B, Han D H. Nondestructive measurement technology for farm products [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 152-163. (in Chinese)
- [2] Kato K. Nondestructive measurement of fruits quality by electrical impedance (Part 1)[J]. Research Report on Agri-cultural Machinery, 1987(17): 51-68.
- [3] 张立彬,胥芳,周国君,等.苹果的介电特性与新鲜度的关系研究[J].农业工程学报,1996,12(3):186-190.
Zhang L B, Xu F, Zhou G J, et al. Study on correlations between dielectric properties and freshness of apples[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(3): 186-190. (in Chinese)
- [4] 胥芳,张立彬,周国君,等.无损检测桃子电特性的试验研究[J].农业工程学报,1997,13(1):202-205.
Xu F, Zhang L B, Zhou G J, et al. Experiment research on the dielectric properties of peaches using the nondestructive measurement method[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(1): 202-205. (in Chinese)
- [5] 胥芳,计时鸣,张立彬,等.水果电特性的无损检测在水果分选中的应用[J].农业机械学报,2002,33(2):53-60.
Xu F, Ji S M, Zhang L B, et al. Nondestructive inspection of dielectric property of fruit and its application in classifying fruit quality [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 53-60. (in Chinese)
- [6] 柯大观,张立彬,胥芳.基于介电特性的水果无损检测系统研究[J].浙江工业大学学报,2002,30(5):446-450.
Ke D G, Zhang L B, Xu F. Study of a fruit nondestructive detection system based on dielectric properties [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2002, 30(5): 446-450. (in Chinese)
- [7] 郭文川,朱新华,郭康权.采后苹果电特性与生理特性的关系及其应用[J].农业工程学报,2005,21(7):136-139.
Guo W C, Zhu X H, Guo K Q. Relationship between electrical properties and physiological properties of post-harvest apples and its application [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 136-139. (in Chinese)
- [8] 叶齐政,姚宏霖,李黎,等.根据水果阻抗的特性频率变化测定采后水果成熟度的方法[J].植物生理学通讯,1999,35(4):304-307.
Ye Q Z, Yao H L, Li L, et al. A method for measuring maturity according to the feature frequency of resistance of post-harvest fruits [J]. Plant Physiology Communications, 1999, 35(4): 304-307. (in Chinese)
- [9] Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Dielectric properties of

fruits and insect as related to radio frequency and micro-wave treatments [J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(2): 201-212.

[10] Nelson S O. Dielectric spectroscopy in agriculture [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2005, 351: 2940-2944.

[11] 中华人民共和国农业部. 2003 年中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 178.
China Agriculture Ministry. China agriculture yearbook 2003 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 178. (in Chinese)

[12] 童 斌, 饶景萍. 柿子成熟过程中几种生理代谢及细胞膜透性的变化[J]. 西北植物学报, 1999, 19(3): 482-486.
Tong B, Rao J P. Changes in several physiological metabolism and membrane permeability of persimmon (*Diospyros kaki* L.) [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1999, 19(3): 482-486. (in Chinese)

[13] 罗自生. 柿果实采后软化过程中细胞壁组分代谢和超微结构的变化 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 651-656.
Luo Z S. Changes in component metabolism and ultrastructure of cell wall of persimmon fruit after being harvested [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2005, 31(6): 651-656. (in Chinese)

[14] 赵世杰, 许长成, 邹 琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进 [J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207-210.
Zhao S J, Xu C C, Zou Q , et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues [J]. Plant Physiology Communications, 1994, 30(3): 207-210. (in Chinese)

[15] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 5.
Cao C N, Zhang J Q. An introduction to electrochemical impedance spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2002: 5. (in Chinese)

[16] 崔晓莉, 江志裕. 交流阻抗谱的表示及应用 [J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2001, 30(4): 53-61.
Cui X L, Jiang Z Y. The plot formats and applications of electrochemical impedance spectroscopy [J]. Journal of Shanghai Teachers University: Natural Sciences, 2001, 30(4): 53-61. (in Chinese)

[17] Mariappan C R, Govindaraj G. Electrical properties of $A_{2.6+x}Ti_{1.4-x}Cd(PO_4)_{3.4-x}$ ($A = Li, K; x = 0.0-1.0$) phosphate glasses [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2006, 352: 2737-2745.

[18] Mariappan C R, Govindaraj G, Roling B. Lithium and potassium ion conduction in $A_3TiB'P_3O_{12}$ ($A = Li, K; B' = Zn, Cd$) NASICON-type glasses [J]. Solid State Ionics, 2005, 176: 723-729.

[19] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 385-395.
Li L T. Physical properties of food [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 385-395. (in Chinese)

[20] Nigmatullin R R, Nelson S O. Recognition of the “fractional” kinetics in complex systems: Dielectric properties of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz [J]. Signal Processing, 2006, 86: 2744-2759.

(上接第 116 页)

[20] 番晓云, 曹琴东, 王根轩, 等. 扁桃与桃光合作用特征的比较研究[J]. 园艺学报, 2002, 29(5): 403-407.
Pan X Y, Cao Q D, Wang G X, et al. Comparative study on photosynthetic characteristics between Almond and Peach [J]. Acta Horticulturae Sinic, 2002, 29(5): 403-407. (in Chinese)

[21] 陶汉之. 茶树光合日变化的研究 [J]. 作物学报, 1991, 17(6): 444-452.
Tao H Z. Studies on the diurnal courses of net photosynthesis in tree [J]. Acta Agronomica Sinica, 1991, 17(6): 444-452. (in Chinese)

[22] Downtow W J S, Grant W J R, Loveys B R. Diurnal changes in the photosynthesis of field grown grapevines [J]. New Phytol, 1987, 105: 71-80.

[23] 史庆华, 朱祝军, 应泉盛, 等. 不同光强下高锰对黄瓜光合作用特性的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1047-1050.
Shi Q H, Zhu Z J, Ying Q S, et al. Effects of excess Mn on photosynthesis characteristics in cucumber under different light intensity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(6): 1047-1050. (in Chinese)