

温度对火柿电学特性的影响

王瑞庆^{1,2}, 周永洪¹, 张继澍^{1*}

(1. 西北农林科技大学生命科学院, 杨凌 712100; 2. 中华全国供销合作总社济南果品研究院, 济南 250014)

摘要: 为了研究温度对完整果实电学特性的影响, 利用 LCR 仪和平行板电极在 100 Hz~3.98 MHz 频率范围测试了火柿果实电学参数的温度特性, 利用生物学和电磁理论解释了电学参数频率特性和温度特性变化机制。结果表明, 果实阻抗、电感和低频电导 ($f \leq 15.8$ kHz) 随频率呈幂函数关系变化; 电容呈波动性变化。当果实温度从 10°C 升高至 40°C, 阻抗下降了 28% (3.98 MHz)~38% (1 kHz), 电感下降了 30% (3.98 MHz)~38% (1 kHz), 电容升高了 43% (3.98 MHz)~56% (1 kHz), 电导呈上升趋势。建立了阻抗、电容、电感与果实温度间的线性关系式, 可用于不同温度下果实电学参数预测。该研究频率范围, 果实组织结构不均一性、电场对果肉细胞穿透能力差异和介电损耗的主导因素变化是影响果实电学参数频率特性的主要原因; 离子传导是主导电学参数温度特性的主要因素。

关键词: 温度, 电学特性, 介电损耗, 频率特性, 柿, 电参数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.045

中图分类号: S183

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0269-06

王瑞庆, 周永洪, 张继澍. 温度对火柿电学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 269-274.

Wang Ruiqing, Zhou Yonghong, Zhang Jishu. Effects of temperature on electrical parameters for 'Huoshi' persimmon fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 269-274. (in Chinese with English abstract)

0 引言

果实的电学特性与品质和生理状态密切相关, 当电学参数与果实成熟^[1]、衰老^[2-3]、损伤^[4]、病害^[5]等关联时, 可以通过电学特性来测定这些变化。因此, 果实电学特性研究对其品质无损检测有重要意义^[6]。然而, 果实电学特性除与自身理化性质有关, 还受其他因素, 如温度等的影响, 这种影响有可能掩盖或扩大因果实自身理化变化而引起的电参数值变化, 因此在利用电学特性进行果实无损检测时, 必须考虑温度变化的影响。同时, 果实电学特性随温度的变化还决定了果实在电场中的加热状况, 因此果实电学参数的温度特性引起人们关注。目前对果实电学参数温度特性仅限于果实切片组织的少量研究。Sipahioglu^[7]对 15 种果蔬组织在 2 450 MHz 下的介电特性研究表明, 介电常数随温度升高而降低。Nelson^[8]测试了苹果、黄瓜等 9 种果实果肉组织介电特性随温度 (5°C~65°C) 和频率 (10 MHz~1.8 GHz) 的变化, 果实温度特性因测试频率不同而有差异。Wang 等^[9]对鳄梨等果实的研究也得到类似结果。上述研究的材料均为果实切片组织, 测试频率 ≥ 10 MHz, 尚未见对完整果实及较低频电学参数温度特性的报道。

本研究在 100 Hz~3.98 MHz 频率范围及果实贮藏、

检测、分级包装过程可能经历的温度区间 (0~40°C), 对火柿电学参数阻抗、电容、电感和电导的频率特性和产生原因进行分析, 并探讨了整个果实温度特性及变化规律, 以期对果实电学特性的在线测定和测试过程温度补偿问题提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

火柿 (*Diospyros kaki* L. Huoshi) 采于西北农林科技大学黄土高原果树试验站 (陕西乾县)。挑选大小均匀、无病虫害、无损伤、八成熟 (2/3 果皮黄绿色) 的果实当天运回实验室, 采后第 2 天进行测定。

1.2 测试系统及方法

果实电学参数的测定系统如图 1 所示, 由 LCR 仪 (日本 HIOKI 公司 3532-50 型, 频率范围 $42 \text{ Hz} \leq f \leq 5 \text{ MHz}$)、自制平行板铜电极和计算机组成, 通过 HIOKI 软件在计算机上对测试仪进行参数设定及数据采集。

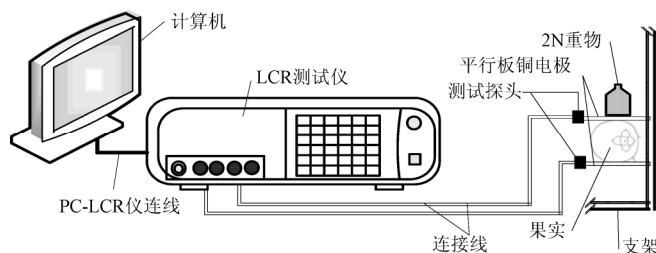


图 1 果实电学参数测量系统

Fig.1 System of fruit electrical properties measurement

将 15 个果实置于低温培养箱内 (日本 Yamato 公司 IL-80 型), 其中 10 个果实用于电学参数测定 (测

收稿日期: 2011-03-23 修订日期: 2011-04-26

项目基金: 国家自然科学基金资助项目 (30471001)

作者简介: 王瑞庆 (1978—), 男, 山东汶上人。博士, 研究方向为果实采后生理与生物物理机制及调控。杨凌 西北农林科技大学生命科学院, 712100。Email: w_ruiqing@163.com

*通信作者: 张继澍 (1941—), 男, 天津静海人, 教授, 博士生导师, 陕西杨凌西北农林科技大学生命科学院, 712100。杨凌 西北农林科技大学生命科学院, 712100。Email: jishu@nwsuaf.edu

试果实),另外5个果实用于监测果实温度变化(监测果实)。培养箱初始温度设为0℃,将果心温度计插于监测果实果心位置,待其内部温度达到设定温度(0℃)后,取出1个测试果实,尽快测定电学参数。测定时,将果实置于两极板之间,赤道线上对称颊部与极板接触,在极板上施加2N外力以使果实与极板接触紧密。在100 Hz~3.98 MHz频率范围,按对数关系间隔选取24个频率点,测定果实的阻抗(Z)、电容(C)、电感(L)和电导(G)。检测电压为1V;室内温度为(20±1)℃。第1个果实测定完成后,继续下一个果实的测定,直至10个果实测定结束。用同样的方法继续依次测定果实在10、20、30和40℃时的电学参数值,测试温度依据果实贮藏、检测、分级包装过程可能经历的温度范围选择。

文中电参数及物理意义如下,阻抗:在正弦交流电路中,电压与电流的比值;电容:物体容纳电荷的能力;电感:果实在交流电场中磁通量与产生此磁通的电流之比;电导:物体的导电能力;损耗系数(D):交流电场

中能量的损耗率。本文中电参数值均为并联等效电路模式测得的数值。

用SPSS 17.0进行数据相关性比较和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 电学参数的频率特性

图2为0~40℃火柿果实阻抗、电容、电感和电导随测试频率变化曲线。在100 Hz~3.98 MHz频率范围,随着测试频率升高,果实阻抗和电感均呈幂函数关系下降,即 $\log f$ 分别与 $\log Z$ 和 $\log L$ 线性相关(决定系数 r^2 分别为0.996和0.999)。果实电容则经历了下降(100 Hz~100 kHz)→上升(100 kHz~1 MHz)→下降(1~3.98 MHz)的过程,数值在1.4~5.6 nF间波动。果实电导随频率变化比较复杂,在100 Hz~15.8 kHz频率范围,火柿电导随测试频率升高,呈幂函数关系上升($r^2=0.999$);测试频率大于15.8 kHz后,电导变化不规则,但整体呈上升趋势。不同温度下,火柿电参数随频率变化趋势相似。

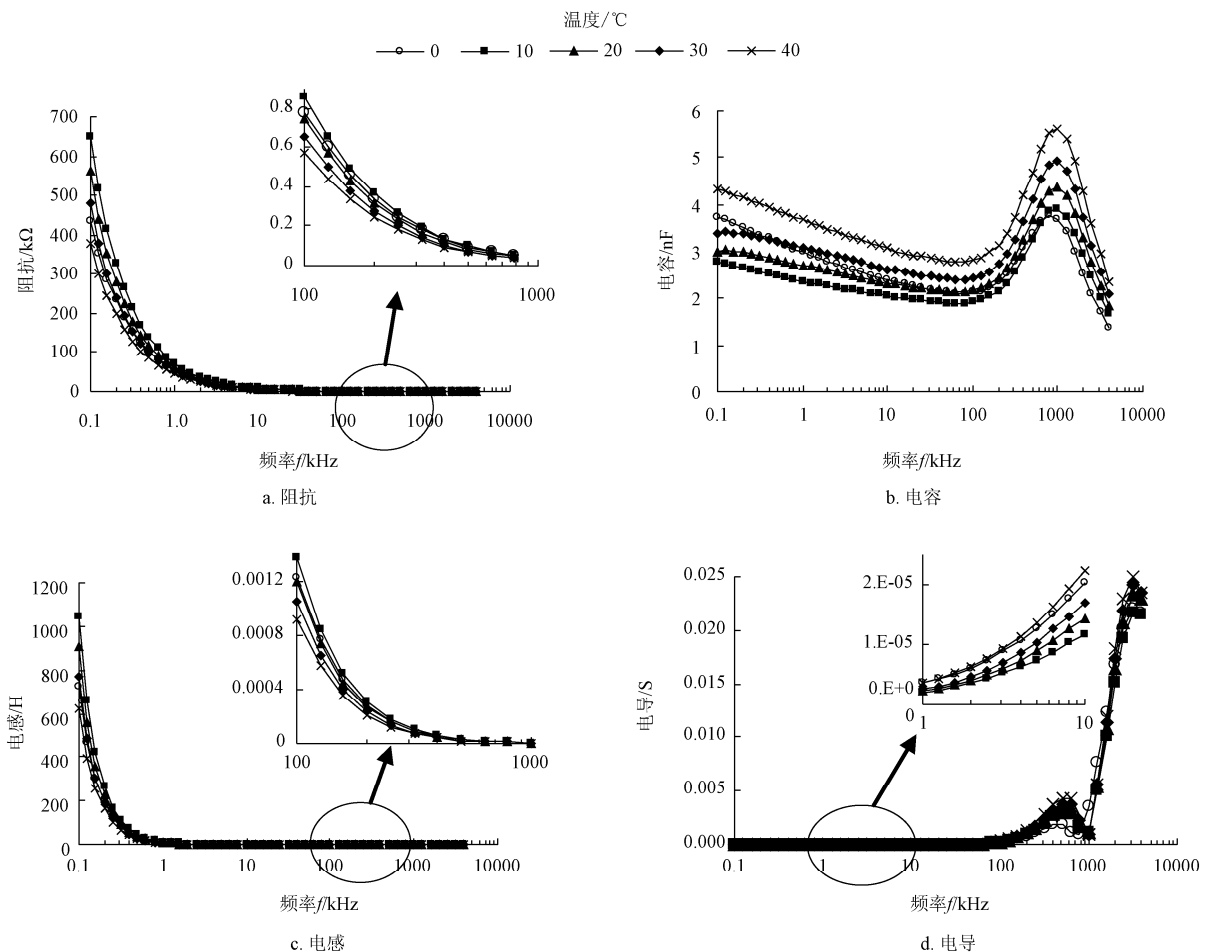


图2 不同温度下火柿电学参数随测试频率变化曲线

Fig.2 Electrical parameters of persimmon fruit at different temperature with different test frequency

2.2 电学参数的温度特性

由图2可知,在0~40℃范围,随温度升高,火柿阻抗和电感逐渐下降,电容和电导呈上升趋势。由于果实

电学参数数值随频率变化很大,为了便于比较果实不同频率下电参数随温度的变化趋势,对1、10、100、1000、3980 kHz频率下电参数值进行类似“归一化”处理,即

在各测试频率下，将 10℃ 果实电参数值设为 1，其他温度下电参数值与其比值作为该温度下相对电参数值。处

理后相对电参数值随温度变化如图 3 所示。

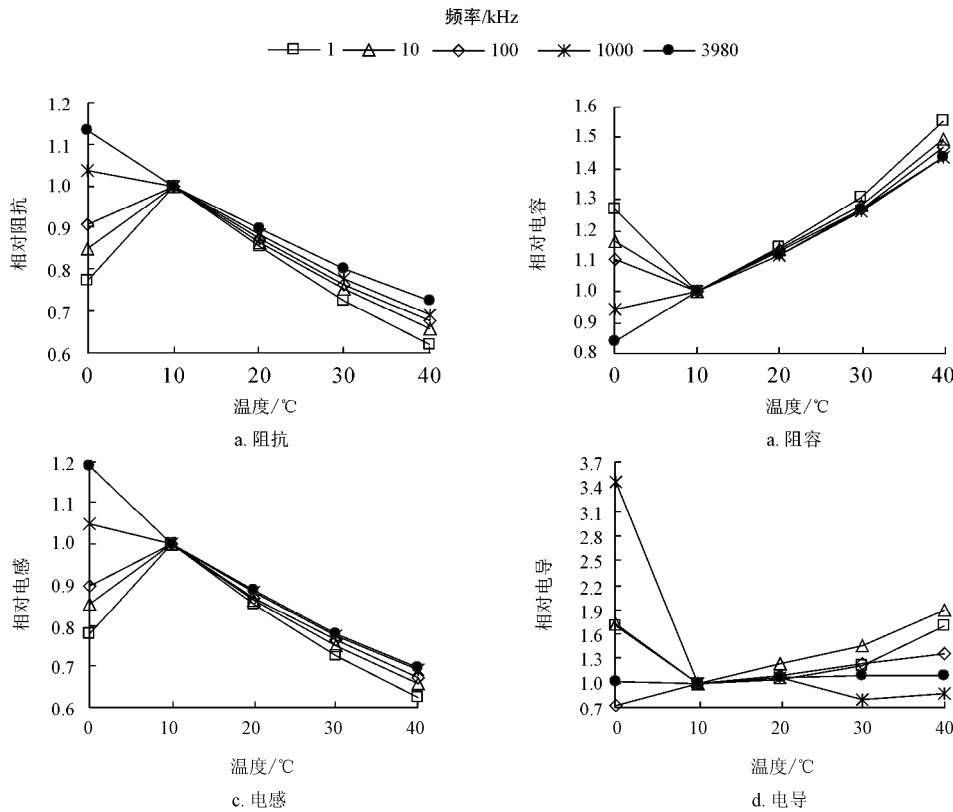


图 3 不同频率下果实电学参数随果实温度的相对变化

Fig.3 Relative variation of fruit electric parameters with different frequency and temperature

由图 3 可知，在 10~40℃ 范围，火柿电学参数阻抗、电容、电感随温度变化有较强规律性。随着果实温度升高，阻抗和电感呈线性显著降低，而果实电容则显著升高 ($P < 0.01$)，即相同测试频率下，阻抗和电感 $Z_{10^\circ\text{C}}/L_{10^\circ\text{C}} > Z_{20^\circ\text{C}}/L_{20^\circ\text{C}} > Z_{30^\circ\text{C}}/L_{30^\circ\text{C}} > Z_{40^\circ\text{C}}/L_{40^\circ\text{C}}$ ；电容 $C_{10^\circ\text{C}} < C_{20^\circ\text{C}} < C_{30^\circ\text{C}} < C_{40^\circ\text{C}}$ 。测试频率不同，电参数随温度变化的幅度也有差异。较低频率下，阻抗和电感随温度升高而下降速率比高频下明显 ($P < 0.01$)，当温度从 10℃ 升高到 40℃ 时，1 kHz 和 3.98 MHz 下，果实阻抗分别较 10℃ 时下降了 38% 和 28%；果实电感分别下降了 38% 和 30%。而电容则随温度升高，低频下数值升高幅度大于高频，1 kHz 和 3.98 MHz 下， $C_{40^\circ\text{C}}$ 分别高于 $C_{10^\circ\text{C}}$ 56% 和 43%。0℃ 果实较高频率下，电参数变化趋势与其他温度果实变化趋势吻合，即随着温度升高，阻抗和电感呈线性下降，电容呈线性升高；而在低频率范围 (0.1~100 kHz)，0℃ 果实电参数值表现出相反趋势，即阻抗和电感 $Z_{0^\circ\text{C}}/L_{0^\circ\text{C}} < Z_{10^\circ\text{C}}/L_{10^\circ\text{C}}$ ，电容 $C_{0^\circ\text{C}} > C_{10^\circ\text{C}}$ ，且频率越低，与 10℃ 果实电参数值差异越大。可见电学参数随温度的变化受测试频率的影响，反之，电学参数随频率的变化也受样品温度的影响。10℃~40℃ 温度范围，随着果实温度升高，电导呈上升趋势，这种趋势在低频范围比较明显，当频率较高时，由于果实电导变化不规律，所以电导值随温度变化规律性也较差。与 10℃ 果实电导值相比，电导值 $G_{0^\circ\text{C}}$ 在高频率下低于 $G_{10^\circ\text{C}}$ ，在低频率下高于 $G_{10^\circ\text{C}}$ 。

10~40℃ 范围，不同频率下果实阻抗、电容和电感随温度的线性变化可用下列方程表示

$$E = Af + B \quad (1)$$

式中， E 代表电参数，不同频率下各电参数与温度回归方程中常量 (A 、 B) 及决定系数见表 1。

表 1 不同频率下电参数与温度回归方程中常量及决定系数
Table 1 Constant and correlation coefficient in equation (1) for electrical parameters at different frequency

频率 f/kHz	阻抗 Z			电容 C			电感 L		
	A	B	r^2	A	B	r^2	A	B	r^2
1	-910.5	80215	0.995	4.34×10^{-11}	1.88×10^{-9}	0.984	-0.1448	12.84	0.994
10	-93.23	9903.5	0.994	3.34×10^{-11}	1.69×10^{-9}	0.988	-0.0015	0.144	0.994
100	-9.253	938.65	0.994	2.96×10^{-11}	1.60×10^{-9}	0.990	1.5×10^{-5}	0.0015	0.994
1000	-0.433	46.192	0.995	5.66×10^{-11}	3.29×10^{-9}	0.992	6.9×10^{-8}	7.36×10^{-6}	0.995

3 讨论

3.1 电参数的频率特性

火柿电参数随测试频率的变化主要由于果实组织结构的不均一性所致。果肉组织主要由薄壁细胞和细胞间隙构成，薄壁细胞含有大的中央液泡，内部存贮了大量水和离子，细胞之间存在细胞间隙，只有相对少量的液体和大量的气体空间^[10]。在低频率下，电流不能通过细胞膜和液泡膜，只能经过细胞间隙（胞外模式），电流

阻力较大；而在高频率下，电流既可以通过细胞间隙传输，也可以穿过细胞膜通过细胞质进行传输（胞内模式），具有较小的阻力^[11]。因此当频率升高时，阻抗下降，而电导升高。这与以往在苹果^[12]、西洋梨^[3]等果实上的研究结果相同。Wu^[13]对茄子阻抗研究结果表明，当冷冻的茄子组织解冻后阻抗值很低，且随频率变化很小，这也说明组织结构不均一性是导致不同频率下电参数变化的重要原因，因为解冻后组织结构破坏，细胞内容物呈熔融状态且结构趋于均一，因此阻抗值很低且随频率变化很小。

果实电容随测试频率的变化机理比较复杂。本研究的频率范围，介质损耗机制主要是离子传导，随频率升高，果实内部离子导电性增强，介电损耗增大，导致电容或介电常数下降^[8]。本研究中，火柿电容随测试频率升高呈现下降（100 Hz~100 kHz）→上升（100 kHz~1 MHz）→下降（1~3.98 MHz）的过程。该变化特性由果实测定时选择的特定频率范围而产生。以往对果实电参数的研究频率多集中于射频-微波高频区或100 kHz以下较低频段。本研究中，在0.1~100 kHz范围，随频率升高果实电容逐渐下降，与以往在苹果^[12,14]和胡萝卜、芹菜、芒果果肉组织^[15]上研究结果类似，低频率下较高的电容是由于离子导电性较小造成的^[8]。而在100 kHz~1 MHz之间果实电容迅速升高，这个现象可能由以下几个原因产生：1）较高频率下，当电流穿过细胞膜和中央液胞时，颗粒周围的阴阳离子在外电场作用下，形成带电双离子层（charged double layers），后者可产生极大的电容，甚至可以超过水的电容^[16]。2）由非均匀混合物介电损耗图4可知，在100 kHz~1 MHz及附近频率范围，由双电层和结晶水（crystal water relaxation）产生的介电损耗/介电弛豫逐渐消失，Maxwell-Wagner介电损耗也在此频段附近消失。介电损耗因素的消失可能会导致电容的升高。为验证此因素，本文测试了不同温度火柿在100 Hz~3.98 MHz范围的损耗系数D（图4）。由图4可知，损耗系数在1 MHz时，处于极低值，说明此频率下介电损耗的消失是导致电容升高的重要因素。另外Feng等^[17]和Wang等^[18]在其他频率范围也发现类似介电特性升高的情况，他们认为可能是由于测试系统（如电极极化）产生的。在大于1 MHz频率范围，电容下降，可能是由于在较高频率下电导升高，并且由束缚水松弛产生的介电损耗在这个频段（1 MHz）开始出现^[16]所致，在图4中，也可以看到实际测定中，损耗系数在大于1 MHz时迅速升高，试验结果与相关理论相符。

果实电导在高频率阶段变化的不规则性，也可以由介电损耗相关理论来解释。直流电导是由于自由电荷和离子移动引起的，这类电导主导了低频率下的电导值^[19]。交流电场产生附加的导电成分，高于一定频率后，附加的导电成分主导电导值。材料在交流电场中电导率可由下式表示^[20]

$$\sigma = 0.556f\epsilon_r'' \quad (2)$$

式中， σ 为电导率，nmhos/cm； f 为频率，kHz； ϵ_r'' 为介

电损耗。

由公式（2）可知，交流电场一定频率范围内，材料电导率与介电损耗呈正比。本研究中，火柿电导在较高频率下的不规则变化曲线（图3d），与其损耗系数曲线（图4）是吻合的。

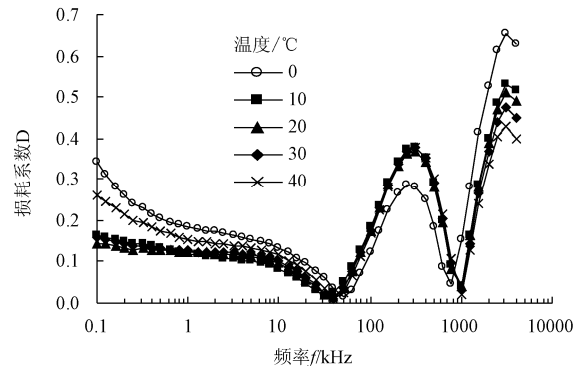


图4 不同温度下火柿损耗系数随测试频率变化曲线

Fig.4 Lose factor for Huoshi fruit with different frequency and temperature

3.2 电学参数的温度特性

温度对果实电学特性影响比较复杂，机理包括自由水离散、束缚水离散和离子传导等，测试频率不同，主导因素也有差异^[17]。以往对果实电学指标的温度特性研究限于果实的切片组织，未见对完整果实电参数温度特性的系统研究。Nelson^[8]对苹果、黄瓜等9种果实果肉切片介电特性随温度（5~65℃）和频率（10 MHz~1.8 GHz）的变化进行测试，在低频下介电常数随温度升高而升高，高频下随温度升高而降低，这种翻转现象发生在10~120 MHz之间，因果实不同而异，在发生翻转的频率上，介电常数不随温度变化而变化。Wang等^[9,18]在27、40、915和1800 MHz频率下，20~60℃温度范围，分别对鳄梨等多种水果果肉组织的温度特性进行研究，结果随果实品种和测试频率不同而有差异。鳄梨、西番莲果、柚子果肉在较低频率下（27 MHz）介电常数随温度升高而升高，较高频率下介电常数不变或降低。苹果、橙子、龙眼、柿子、白人心果等果肉介电常数在测试频率范围随温度升高均呈下降趋势。Sipahiolglu^[7]和Sharma^[21]在高频率下（2450 MHz）对果蔬的研究表明，正常状态果蔬产品介电常数随温度升高而降低^[22]。本研究测试频率范围属于上述研究在低频方向的延续，并首次对完整果实电学指标的温度特性进行探索。10~40℃范围，随温度升高，电容逐渐升高，与上述Nelson^[8]的研究及Wang等^[9,18]对鳄梨、柚子等水果果肉组织低频范围测试结果相同，验证并延伸了此现象发生的频率范围。在低频范围，离子传导对电学性质起主导作用，随温度升高，离子导电性增强，引起阻抗下降。本研究中未出现温度特性翻转^[8]现象，是由于测试频率范围低于翻转频率所致。由于样品温度对果实电参数的测定结果有显著影响（ $P < 0.01$ ），因此不同温度下测得的果实电参数值，只有经过温度换算和校正才有意义。在利用电参数进行果实无损伤检测中，必须考虑温度影响；在进行在线测定仪器设计时，

应考虑测试值温度补偿问题。

以往对果实电学参数的温度特性研究范围通常大于等于 5℃, 本研究将测试温度扩展到 0℃。0℃时, 果实低频(如 1、10 和 100 kHz)电学特性与其他温度有较大差异, 数值无法用其他温度下电特性的规律性变化来推测, 而高频率下(如 3.98 MHz)其电特性与其他温度下电参数变化趋势吻合。由于在低频下(如 100 Hz), 电流只能经过质外体途径传播, 高频下(如 3.98 MHz), 电流既可通过质外体模式传播, 也可通过共质体模式传播^[1], 因此低频下测定的是果实质外体电特性, 高频下测定的是共质体电特性。0℃下, 果实低频电学特性的特殊性, 说明在 0℃, 果实细胞质外体发生了明显的生理生化或结构变化。

4 结 论

1) 火柿阻抗、电容和电感在 0~40℃范围随温度变化显著($P<0.01$), 变化幅度分别为 38%、56%和 38%。果实阻抗、电容和电感与温度(10~40℃)呈线性显著相关($P<0.01$), 决定系数 r^2 分别为 0.995、0.992 和 0.995。在利用电参数进行果实无损伤检测时, 必须考虑温度对测试结果影响。

2) 火柿阻抗、电感和电导与频率呈函数关系。果实组织不均一性、不同频率下电流穿透能力和介电损耗主导因素差异是导致电参数频率特性的主要因素。

3) 与其他温度下果实电参数规律性变化比较, 0℃果实的电学参数值发生离散, 要解释该现象, 需对该温度下果实结构、成分及存在状态进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Soltani M, Alimardani R, Omid M. Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system[J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4(6): 443—447.
- [2] Guo W, Nelson S O, Trabelsi S, et al. 10-1800 MHz dielectric properties of fresh apples during storage[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(4): 562—569.
- [3] 王瑞庆, 张继澍, 马书尚. 基于电学参数的货架期红巴梨无损检测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 243—247.
Wang Ruiqing, Zhang Jishu, Ma Shushang. Nondestructive determination of the quality of Red Bartlett pear during shelf-life by electrical characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 243—247. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张立彬, 陈子辰. 苹果内部品质的电特性无损检测研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 104—106.
Zhang Libin, Chen Zichen. Nondestructive measurement of internal quality of apples by dielectric properties[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 104—106. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马海军, 宋长冰, 张继澍, 等. 电激励信号频率对红点病苹果采后电学特性影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 97—101.
Ma Haijun, Song Changbing, Zhang Jishu, et al. Influence of frequency of electric excitation signal on dielectric property of Fuji apples with Red-dot disease[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(10): 97—101. (in Chinese with English abstract)
- [6] Nelson S O. Dielectric spectroscopy in agriculture[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2005, 351(33/36): 2940—2944.
- [7] Sipahioglu O, Barringer S A. Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 234—239.
- [8] Nelson S O, Trabelsi S, Kays S J. Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1977—1981.
- [9] Wang S, Monzon M, Gazit Y, et al. Temperature-dependent dielectric properties of selected subtropical and tropical fruits and associated insect pests[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(5): 1873—1881.
- [10] Woolley J T. Maintenance of air in intercellular spaces of plants[J]. Plant physiology, 1983, 72(4): 989.
- [11] Harker F R, Maindonald J H. Ripening of nectarine fruit: changes in the cell wall, vacuole, and membranes detected using electrical impedance measurements[J]. Plant Physiology, 1994, 106(1): 165.
- [12] Hart F X, Cole W H. Dielectric properties of apples in the range 0.1-100 kHz[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(3): 621—631.
- [13] Wu L, Ogawa Y, Tagawa A. Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing-thawing treatments on its impedance characteristics[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(2): 274—280.
- [14] 胥芳, 计时鸣. 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—56.
Xu Fang, Ji Shiming. Nondestructive inspection of dielectric property of fruit and its application in classifying fruit quality[J]. Transactions of the CSAM, 2002, 33(2): 53—56. (in Chinese with English abstract)
- [15] Fu W R, Lin E L. Application of AC impedance spectroscopy analysis for solid foods[C]//ASAE Annual Meeting, 2003, Paper number 036145.
- [16] De Loor G P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water[J]. Journal of Microwave Power, 1968, 3(2): 67—73.
- [17] Feng H, Tang J, Cavalieri R P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 129—135.
- [18] Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave treatments[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(2): 201—212.
- [19] Nelson S O. Electrical properties of grain and other food materials[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1978, 2(2): 137—154.
- [20] Icier F, Baysal T. Dielectrical Properties of Food Materials—2:

- Measurement Techniques[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2004, 44(6): 473—478.
- [21] Sharma G P, Prasad S. Dielectric properties of garlic: *Allium sativum* L. at 2450 MHz as function of temperature and moisture content[J]. Journal of food Engineering, 2002, 52(4): 343—348.
- [22] Bengtsson N E, Risman P O. Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. II. Measurements on food materials[J]. Journal of Microwave Power, 1971, 6(2): 107—123.

Effects of temperature on electrical parameters for ‘Huoshi’ persimmon fruit

Wang Ruiqing^{1,2}, Zhou Yonghong¹, Zhang Jishu^{1*}

(1. College of Life Sciences, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Jinan Fruit Research Institute, China Supply and Marketing Cooperatives, Ji'nan, 250014, China)

Abstract: In order to investigate the effects of temperature on electrical parameters for ‘Huoshi’ persimmon fruit, variation of electrical parameters with temperature of intact ‘Huoshi’ persimmon fruit was studied over a frequency range from 100 Hz to 3.98 MHz with LCR meter and parallel plate electrode. Frequency and temperature characteristics of electrical properties were also illuminated by biology and electromagnetism theories. The results showed that fruit impedance, inductance and low frequency ($f \leq 15.8$ kHz) conductance varied in exponential form with the increase of frequency. As the fruit temperature rised from 10°C to 40°C, fruit impedance decreased from 28% at 3.98 MHz to 38% at 1 kHz, the inductance 30% at 3.98 MHz to 38% at 1 kHz, while the capacitance increased from 43% at 3.98 MHz to 56% at 1 kHz, and the conductance had an increasing trend. Linearly correlation equations were built between fruit temperature and electrical parameters for the prediction of electrical parameter values at different temperatures. Frequency properties of fruit electrical parameters were attributed to the in-homogeneity of fruit structure, penetrating capacity variance of the electric field to the flesh and the variation of dominant dielectric loss factors at different frequency ranges, while the ionic conduction accounted for the temperature behavior of the electrical parameters.

Key words: temperature, electric properties, dielectric losses, frequency response, persimmon, electrical parameters