

# 基于电学特性进行果实品质无损检测的可行性研究

王瑞庆<sup>1,2</sup>, 唐燕<sup>1</sup>, 黄森<sup>3</sup>, 杜光源<sup>3</sup>, 张继澍<sup>1\*</sup>

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

**摘要:** 本文介绍了用日置 LCR 仪测定果实宏观电学特性, 与同步测定的生理指标进行比较研究, 从中探索标志果实成熟度、品质、感染病害、机械损伤的敏感电学参数及测试频率、温度的影响, 为基于电学特性进行果蔬品质无损检测的可行性提供实验证据。

**关键词:** 敏感电学参数; 生理生化变化; 果实品质; 无损检测

## Feasibility of non-destructive quality test of fruit based on electrical properties

WANG Rui-Qing<sup>1,2</sup>, TANG Yan<sup>1</sup>, HUANG Sen<sup>3</sup>, DU Guang-Yuan<sup>3</sup>, ZHANG Ji-Shu<sup>1\*</sup>

(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; 3. College of Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**ABSTRACT:** The macroscopic electrical properties of fruits tested by the LCR meter and their synchronously tested physiological indices were comparatively studied, and the effects of fruit maturation, quality, diseases infection, injury, test frequency and temperature were explored to provide the experimental evidence for the feasibility of non-destructive quality determination of fruits and vegetables based on the electrical properties.

**KEY WORDS:** sensitive electrical parameters; physio-chemical variation; fruit quality; non-destructive test

果蔬电学特性主要用于预测果蔬射频(RF)、微波频率(MF)加热时的热效率。果蔬成熟衰老过程, 内部结构和化学成分发生着变化, 引起宏观电学特性的变化, 通过对宏观电学特性和果蔬成熟衰老指标相关性的研究, 找到电学参数与生理指标的关系, 对无损检测果蔬品质有很好应用前景。以往研究表明, 果蔬的电学特性随着果蔬成熟衰老而变化<sup>[1-3]</sup>, 电学参数与生理指标之间的关系, 尚不清楚。找到与果蔬成熟衰老相关的电学参数, 并确立其与成熟衰老相关生理指标的关系, 将有助于利用电学参数进行无损检测。本课题组对西红柿、猕猴桃、桃、西

洋梨、柿子等果实的交流阻抗特性, 如电阻(R)、电导(G)、阻抗(Z)、电抗(X)、电感(L)等进行研究, 探讨电学参数与生理指标间的相关性, 为利用电学参数对果蔬品质进行无损检测提供依据。

## 1 测试系统及方法

平行板电极法测定果实电学参数测试系统如图1所示, 由LCR仪(HIOKI 3532-50型, 日本日置电机株式会社)、自制平行板铜电极和计算机组成, 通过HIOKI软件(仪器自带)在计算机上对测试仪进行参数设定及数据采集。

基金项目: 国家自然科学基金项目(30471001)

\*通讯作者: 张继澍, 教授, 博士生导师, 研究方向为果蔬采后生理与生物物理机制及调控。Email: jishu@nwsuaf.edu.cn

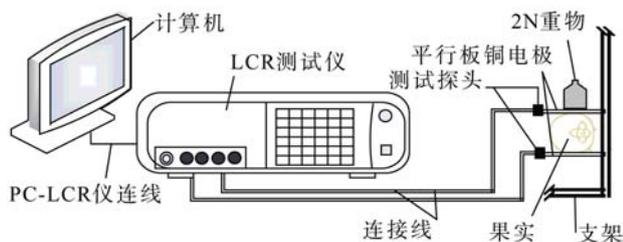


图1 果实电学参数测量系统

Fig. 1 Schematic diagram of the fruit electrical properties measurement system

马海军<sup>[1]</sup>和唐燕<sup>[2]</sup>通过 LCR 电子测试仪对苹果、猕猴桃和桃采后所测 14 个电学参数间的关系的系统分析发现, 果实的 14 个电参数随频率的变化呈非线性变化。其中复阻抗( $Z$ )、阻抗相角( $\theta$ )、串联等效电容( $C_s$ )、并联等效电容( $C_p$ )、损耗系数( $D$ )、串联等效阻抗( $R_s$ )、并联等效阻抗( $R_p$ )、电抗( $X$ )随频率变化呈三次函数曲线变化。导纳( $Y$ )、串联等效电感( $L_s$ )、并联等效电感( $L_p$ )、电导( $G$ )、电纳( $B$ ) 随频率呈指数函数变化。因此, 对 LCR 测试仪的 14 个电学参数, 只需检测如下 7 个电学参数: 复阻抗( $Z$ )、阻抗相角( $\theta$ )、并联等效电容( $C_p$ )、损耗系数( $D$ )、并联等效阻抗( $R_p$ )、电导( $G$ )、和电纳( $B$ ), 这既简化了手续又可节约时间和成本。张院民<sup>[3]</sup>研究表明, 以单位果实厚度单位电极面积的电指标值替代电指标的测定值更能准确地反映果实采后果肉的变化, 研究表明  $4\text{ cm}^2$  电极测定华优猕猴桃果实采后单位厚度单位电极面积的电指标灵敏度最高, 不同贮藏期果实电指标的差异性最大, 电指标和贮藏时间在一定频率范围内表现了良好的线性关系。

## 2 电学特性与生理生化变化关系研究

### 2.1 标志果实成熟度的敏感电学参数探讨

果实电学参数随成熟度变化而改变。陈志远等<sup>[4]</sup>测试了绿熟期(MG)、白熟期(BR)、转色期(TU)、粉红期(PNK)、红熟期(RED)5 个成熟度番茄果实电学参数与成熟度的关系。随着成熟度的增加, 果实的复阻抗值逐渐减小, 而其相对介电常数逐渐增加; 在番茄的转色期, 其损耗系数具有最大值, 而复阻抗相角具有最小值。复阻抗和相对介电常数可以作为辨别番茄果实成熟度的合适电参数, 而损耗系数和复阻抗相角可以作为辨别其转色期的指标。随后他们应用 BP 神经网络建立了番茄果实成熟度的预测模型, 此

模型的预测能力较好, 预测准确率达到 70%<sup>[5]</sup>。王瑞庆等<sup>[6]</sup>在火柿上的研究表明, 随着火柿果实由绿变红, 成熟度的逐渐增加, 不同测试频率下果实阻抗下降了 43%(3.98 MHz 下)~59%(158 kHz 下), 电容升高了 67%(3.98 MHz 下)~148%(251 kHz 下)。唐燕等<sup>[7]</sup>在海沃德猕猴桃的研究发现, 在 1 MHz 频率下, 成熟度 I 的果实复阻抗明显高于成熟度 II 的果实, 而且从贮藏 7d 开始, 两成熟度果实复阻抗( $Z$ )值差异达显著水平( $P<0.05$ )。在 10 kHz 频率下, 成熟度 I 果实并联等效电容( $C_p$ )值明显高于成熟度 II 的果实, 而且从贮藏 7d 开始, 两成熟度果实  $C_p$  值差异达显著水平( $P<0.05$ )。因而在特征频率可以根据  $Z$  值差异对成熟和成熟度 的果实加以区分。

### 2.2 标志果实品质的敏感电学参数探讨

果实电学参数与果实品质有较好的相关性。王玲等<sup>[8]</sup>发现并联等效电阻在 0.1 kHz 时与果肉硬度呈极显著正相关( $r=0.986$ )、与可滴定酸含量呈显著正相关( $r=0.934$ ), 可作为标志果肉硬度和可滴定酸含量的敏感电参数。邵晓蕾等<sup>[9]</sup>以富平尖柿为材料, 利用相关分析、回归分析和主成分分析法, 在 0.1~3980 kHz 频段范围内的 24 个频率点上研究了果实采后成熟衰老过程中 6 个电学指标与 4 个品质指标之间的关系。各品质指标与电参数进行多元逐步回归, 在回归方程中, 仅用  $Z$  值就可以反映出尖柿果实采后果肉硬度和可滴定酸含量的变化, 相关系数分别可达到 0.98 和 0.85。 $R_s$  和  $C_p$  可以反映可溶性固形物和可溶性单宁含量的变化, 其标准化残差分析值均在  $(-2, 2)$  区间内, 表明利用电参数  $Z$ 、 $R_s$  和  $C_p$  来预测尖柿果实采后不同贮藏时间的品质指标具有很好的可靠性和准确性。 $Z$ 、 $R_s$  和  $C_p$  可作为标志尖柿果实成熟衰老过程中品质指标变化的敏感电参数。利用电容可判断尖柿果实脱涩情况, 当电容  $C_p$  大于 2.66 nF 时, 果实已经完全脱涩。在红巴梨<sup>[10]</sup>上的研究表明, 随贮藏时间的延长, 果实复阻抗、并联等效电感显著下降, 而相对介电常数和电导显著上升( $P<0.01$ )。果实阻抗和电感与果实硬度显著正相关( $P<0.01$ ), 相关系数分别可达 0.84 和 0.83, 果实电容与硬度显著负相关, 相关系数可达 0.73。在火柿<sup>[6]</sup>上的研究结果与红巴梨类似, 果实阻抗、电感和电容与果实硬度相关性显著( $P<0.01$ )。富士苹果<sup>[11]</sup>的  $Z$  值与可滴定酸相关性达到极显著水平, 可用电学参数串联等效电阻( $R_s$ )和  $Z$

值建立回归方程反映品质指标硬度、可滴定酸的变化,可通过相对介电常数( $\epsilon'$ )和 $Z$ 值来预测苹果色度的变化。马海军<sup>[1]</sup>用灰色系统理论的GM(1,6)模型建立了苹果品质多因子动态变化的数学模型,可确定苹果理化特性的各项指标对电学参数的影响与作用;用灰色系统理论的GM(1,2)模型确定了苹果电学特性与理化特性之间的关系,认为可用 $C_p$ 和 $R_p$ 描述苹果的TSS,用 $R_p$ 描述苹果的TA;建立了deg和 $C_p$ 灰色系统理论的预测模型GM(1,1),通过验证,确定了预测模型的可用性。在猕猴桃的研究<sup>[12]</sup>发现,硬度、TSS、TA、相对电导率、淀粉、原果胶、纤维素可在特征频率下用 $Z$ 、 $C_p$ 量化,其中 $Z$ 和各生理参数相关性高的频率点较多。TA、相对电导率、淀粉、纤维素和Xyl与 $\theta$ 在所测试的24个频率下相关性普遍较高,认为 $\theta$ 量化上述生理指标的可靠性高。在所测试频率范围的24个频率下,果实 $L_p$ 和12个生理参数的相关性都普遍差( $P>0.05$ )。

### 2.3 标志果实病害的敏感电学参数探讨

马海军等研究了富士苹果红点病<sup>[13]</sup>、虎皮病<sup>[14]</sup>发生与果实电学特性的关系。20℃恒温条件下,贮藏70d的富士苹果红点病果实与正常果的介电常数( $\epsilon'$ )和损耗因子( $\tan\delta$ )差异显著( $P<0.05$ )。 $\tan\delta$ 和 $\epsilon'$ 基本可以反映水果的红点病情况。富士苹果在20℃ $\pm$ 1℃恒温条件下贮藏1、8、15、22和29d,随着频率(100 Hz~3.98 MHz)的增加,虎皮病果实的 $Z$ 和 $X$ 在减小, $G$ 则在增加;病果和正常果的各电参数变化趋势一致,但数值有很大不同,其中电容间存在显著差异。可以用电容来挑分虎皮病感病果实。

### 2.4 标志果实损伤的敏感电学参数探讨

马海军<sup>[1]</sup>测试了40 cm和70 cm高处自由跌落至大理石地面上碰伤的富士苹果损伤后(0(伤害后立即测定时间)、0.5、1、2、4、8、12、24和48 h)后电学参数的变化。40 cm处碰伤的果实和70 cm处碰伤的果实与正常果比较,在100 Hz~3.98 MHz频率下,其阻抗和电容在同一个伤害时间内随频率的增加差异明显,基本可以正确反映水果的伤害情况;碰伤果和正常果最佳区分的电参数频率为10 kHz。陈志远<sup>[5]</sup>研究了损伤对番茄电参数的影响。在未损伤与已损伤的果实之间,电参数复阻抗( $Z$ )、相对介电常数和电阻( $R$ )表现出显著的差异性,可作为区分果实是否损伤的依据参数,并建立了番茄果实损伤程度的预测模

型,此模型的预测能力很好,准确率可到90%。唐燕等<sup>[15]</sup>研究了损伤对猕猴桃果实电特性的影响,研究方法和马海军一致,结果表明,随着贮藏时间的延长,损伤处理能引起电参数发生变化,但不改变果实电参数的总体变化趋势。6个电参数中,电参数 $Z$ 对损伤的响应最灵敏,其次是电参数 $D$ ,其余电参数响应灵敏度差。

## 3 影响果实电特性测试的因素研究

### 3.1 测试频率的影响

果实电学特性随着测试频率变化而明显变化。在100 Hz~3.98 MHz范围,随着测试频率升高,火柿<sup>[16]</sup>果实阻抗、电感随频率呈幂函数关系下降,即 $\log f$ 分别与 $\log Z$ 和 $\log L_p$ 线性极显著相关,决定系数 $r^2>0.996$ , $P<10^{-55}$ 。电导随频率变化比较复杂,低频下( $f=15.8$  kHz)随测试频率升高呈幂函数上升, $P<10^{-39}$ ;  $f>15.8$  kHz时,随频率变化规律不明显。电容与频率呈波动性变化。红巴梨<sup>[10]</sup>果实电学参数随频率变化与火柿相似。不同频率下果实电学参数与理化指标间的相关性也存在较大差异。邵晓蕾等<sup>[9]</sup>通过研究筛选出了能够用于尖柿果实无损检测的特征频率和敏感电参数。不同频率下复阻抗( $Z$ )、串联等效电阻( $R_s$ )、并联等效电容( $C_p$ )、并联等效电感( $L_p$ )、电导率( $\sigma$ )和损耗角(Deg)与品质指标的相关性存在明显差异,在398 kHz下品质指标与电参数的综合相关性最好,398 kHz可作为尖柿果实采后品质无损检测的特征频率。不同果蔬特征频率也存在差异,陈志远<sup>[4]</sup>对番茄研究认为,500 kHz~5 MHz是测定番茄果实电指标的最佳频率段。而在西洋梨<sup>[10]</sup>和火柿上的研究表明,1 MHz为它们的最佳测试频率。王瑞庆<sup>[6]</sup>指出,在0.1~3980 kHz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参数频率特性的主要原因。

### 3.2 温度的影响

王瑞庆等<sup>[17]</sup>研究了温度对完整火柿果实电学参数的影响。当果实温度从10℃升高至40℃,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。该研究建立了阻抗、电容、电感与果实温度间的线性关系式,决定系数 $r^2>0.99$ ,可用于不同温度下果实电学参数预测。

研究还指出, 0.1~5000 kHz 测试频率范围, 离子传导是主导电参数温度特性的主要因素。杜光源等<sup>[18]</sup>在嘎啦苹果的研究中将平行板电极改为一次性心电图电极, 测定并分析了复阻抗等4个电参数随果实温度升高过程的变化。结果表明: 在所测试的24个频率下,  $Z/Ls/Rs\ 0\ ^\circ\text{C} > Z/Ls/Rs\ 5\ ^\circ\text{C} > Z/Ls/Rs\ 10\ ^\circ\text{C} > Z/Ls/Rs\ 15\ ^\circ\text{C} > Z/Ls/Rs\ 20\ ^\circ\text{C} > Z/Ls/Rs\ 25\ ^\circ\text{C}$ 。而Cs的变化与之相反。果实升温到25℃与起始0℃相比, Z和Rs下降显著( $P < 0.05$ ), 而Cs有显著的上升( $P < 0.05$ )。运用一次性心电图电极的测定方法, 试验数据偏差小, 说明该测试方法的稳定性和可靠性都很好。由于样品温度对果实电参数的测量结果有较大影响, 因此在实际测定时, 应注意温度的影响因素, 测定冷藏果实电参数时应等到果实恢复到室温状态后再进行电特性的测定。

除测试频率和温度外, 其他因素如电压等对果实电学参数也有较大影响。因此, 测定时要保持参数的恒定很关键。

#### 4 结 语

果实的电学特性随着果实的成熟衰老、病害发生、碰撞损伤而变化, 且受到测试频率、温度等条件的影响。通过果实电学参数与不同生理状态下的生理生化指标的相关性研究, 找到对生理生化变化敏感的电学参数, 确立最佳测试条件, 可以达到对果实理化指标进行无损检测的目的。

#### 参考文献

- [1] 马海军. 用电学参数标志苹果采后病害和机械损伤响应机制的研究[D]. 西北农林科技大学, 2010.
- [2] 唐燕. 猕猴桃和桃电学特性和生理特性关系研究[D]. 西北农林科技大学, 2010.
- [3] 张院民. 电特性测定方法及华优猕猴桃果实采后电特性与生理特性关系的研究[D]. 西北农林科技大学, 2012.
- [4] 陈志远, 张继澍, 刘亚龙, 等. 番茄成熟度与其电学参数关系的研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(4): 826-830.
- [5] 陈志远. 番茄电特性的无损检测与生理特征关系的研究[D]. 西北农林科技大学, 2007.
- [6] 王瑞庆. “火柿”和“红巴梨”电参数与生理生化变化关系研究[D]. 西北农林科技大学, 2011.
- [7] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 1-MCP 对不同成熟度猕猴桃电特性的影响[J]. 2012, 32(5): 6-11.
- [8] 王玲, 黄森, 张继澍, 等. “嘎拉”苹果果实品质的电学特性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 402-407.
- [9] 邵晓蕾, 黄森, 于春阳, 等. 尖柿果实采后电学特性和品质指标的关系[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9): 80-87.
- [10] 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.
- [11] 安慧珍, 马惠玲, 任小林. 苹果果实贮藏期间电学参数与品质指标的关系[J]. 食品科学, 2012-05-04.(网络预发表)
- [12] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 猕猴桃贮藏期电参数和生理参数的变化[J]. 农业机械学报, 2012, 43: 127-133.
- [13] 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.
- [14] 马海军, 冯美, 张继澍. 100Hz-3.98 MHz 下苹果虎皮病果实电学特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 105-109.
- [15] 唐燕, 杜光源, 张继澍. 损伤对猕猴桃果实电学特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 6-11.
- [16] 周永洪, 黄森, 张继澍, 等. 火柿果实采后电学特性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 117-122.
- [17] 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.
- [18] 杜光源, 唐燕, 郭霁光, 等. 温度对“嘎拉”苹果电参数的影响[J]. 2012-04-17. (网络预发表)

(责任编辑: 张宏梁)

#### 作者简介



王瑞庆, 男, 博士, 研究方向为果蔬贮藏保鲜。

E-mail: w\_ruiqing@163.com



张继澍, 男, 教授, 博士生导师。研究方向为果蔬采后生理与生物物理机制及调控。

E-mail: jishu@nwsuaf.edu.cn