

# 梨生长发育后期介电特性、生理特性和内部品质的关系

郭文川, 孔繁荣, 王转卫, 刘大洋

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为了了解生长发育后期梨的介电特性与生理特性和内部品质的关系, 采用同轴探头技术测量了生长发育后期2个月内梨在20~4500 MHz间的介电参数(相对介电常数 $\epsilon'$ 和介质损耗因子 $\epsilon''$ ), 同时测量了梨的生理参数(乙烯释放量和呼吸强度)以及内部品质参数(可溶性固形物含量SSC、硬度和含水率)。结果表明: 在所测频率范围内,  $\epsilon'$ 随频率的增加而减小,  $\epsilon''$ 在25 MHz附近存在极大值, 在1300 MHz附近存在极小值。 $\epsilon'$ 和 $\epsilon''$ 随时间的推移先减小后增大。糖度和硬度随时间的推移呈下降趋势。呼吸高峰出现于乙烯释放高峰之前, 且乙烯释放高峰的出现时间与介电参数由减小到增大的转折点相同。介电参数与SSC和硬度之间没有明显的线性关系。研究说明, 梨的介电特性是生理特性的反映, 可以根据介电参数值判断梨的成熟情况, 但是单一频率下的介电参数值很难用于评价梨的内部品质。

**关键词:** 梨;介电特性;生理特性;品质;成熟

文章编号: 1673-9078(2015)11-56-61

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.11.010

## Relationship between Dielectric Properties, Physiological Properties, and Internal Qualities of Pears during the Late Growth Stage

GUO Wen-chuan, KONG Fan-rong, WANG Zhuan-wei, LIU Da-yang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** To understand the relationship of dielectric properties and physiological properties with the internal qualities of pears during the late growth stage, the open-ended coaxial-line probe technique was used to measure the permittivities (relative dielectric constant  $\epsilon'$  and dielectric loss factor  $\epsilon''$ ) of pears over the frequency range of 20~4500 MHz during the last 2 months of the ripening period, along with the physiological properties (amount of released ethylene and respiration intensity) and internal qualities (soluble solid content [SSC], firmness, and moisture content). Over the frequency measurement range,  $\epsilon'$  decreased with increase in frequency, and  $\epsilon''$  had maximum and minimum values at approximately 25 MHz and 1300 MHz, respectively. Over time,  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  increased after the initial decrease, and sugar content and firmness decreased generally. The respiration peak occurred before the peak of released ethylene, and the time when the peak of released ethylene appeared was the same as the turn point when permittivities changed from decreasing to increasing. Apparent linear relationships of the permittivities with SSC and firmness were not found. The results indicate that the dielectric properties of pears are the reflection of physiological properties and that the maturity of pears can be determined on the basis of values of permittivities. However, it is difficult to use the value of a permittivity at a single frequency to assess the internal qualities of pears.

**Key words:** pear; dielectric properties; physiological properties; quality; maturity

大部分水果在生长发育期间其果皮的顏色发生变化, 这有助于了解水果的成熟度, 从而指导水果的生产和采收。梨是我国三大水果(苹果、柑橘和梨)之一, 其在生长发育期间果皮颜色变化很小,

收稿日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31171720)

作者简介: 郭文川(1969-), 女, 博士, 教授, 主要从事农产品和食品品质无损检测技术研究

很难根据果皮颜色判断梨的成熟度。因此, 提供判断梨是否发育成熟的客观量化参数对于指导梨的生产和采收具有重要的意义。果实内部含有丰富的水分以及离子化合物, 因此从微观结构上看果实内部存在大量的带电粒子。在果实生长发育期间, 其内部组织发生的生理生化等变化都伴随物质和能量的转换, 使得内部组织所带电荷在空间分布上发生变化, 从而影响果实的宏观电特性<sup>[1]</sup>。

郭文川等采用平行极板技术研究了成熟期苹果的介电参数和生理生化参数的变化规律,发现随着苹果成熟度的增加,相对介电常数和电阻率变化的转折点与 pH 和可溶性固形物含量(SSC)变化的转折点相同<sup>[2]</sup>;采后苹果在乙烯释放高峰出现时相对介电常数达到最大值,而电阻率达到最小值<sup>[3]</sup>。采用同轴探头技术对成熟期苹果介电特性的研究结果说明,介质损耗角正切与 SSC 有较好的线性相关性<sup>[4]</sup>。唐燕等采用平行极板技术测量了采后猕猴桃的介电参数,并对介电参数与生理参数的关系进行了相关性分析<sup>[5]</sup>。目前对水果介电特性的研究主要集中于了解采后水果,如桃<sup>[6]</sup>、油桃<sup>[7]</sup>、苹果<sup>[8-10]</sup>、柿子<sup>[11]</sup>、西瓜<sup>[12]</sup>、蜜瓜<sup>[13]</sup>、葡萄<sup>[14]</sup>等的介电特性与品质的关系方面,尚未见生长发育期间梨介电特性与生理特性和内部品质关系的报道。“砀山酥”梨为我国主要的晚熟梨品种之一。为此,本文以“砀山酥”梨为对象,采用同轴探头技术测量生长发育后期 2 个月内梨的介电参数(相对介电常数  $\epsilon'$  和介质损耗因数  $\epsilon''$ ),同时测量生理参数(乙烯释放量和呼吸强度)以及内部品质(硬度、SSC 及含水率),分析介电特性的变化机理,探索介电特性与生理特性及内部品质的关系,以期为梨成熟情况的判断提供量化参数,并为梨成熟度无损检测仪的开发提供基础数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

“砀山酥”梨从开花到成熟一般经过 135 d 左右。试验从“砀山酥”梨开花后 112 d(2013 年 7 月 25 日)持续到开花后 177 d(2013 年 9 月 28 日),此阶段属于梨的生长发育后期乃至衰老期。每隔 10 d 左右从陕西杨凌某农户的果园采样一次,共采样 7 次。选用无病虫害和无机械损伤、形状规则的梨为试验样品,每次用样 25~30 个。试验前用面巾纸擦拭掉梨表面的灰尘等杂物。试验所用梨的质量为  $260 \pm 24$  g。

### 1.2 测 量 方 法

#### 1.2.1 介电参数的测定

介电参数测试系统由 E5071C 型网络分析仪、85070E 末端开路同轴探头和 85070C 软件(Agilent Technology, 檳城, 马来西亚)组成。在对网络分析仪进行开路、短路和  $50 \Omega$  负载校准之后,设定网

络分析仪的测量频率为 20~4500 MHz,设定对数坐标下的等间距采集点数为 201。随后用开路、短路及  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  去离子水校准 85070E 探头。将完好无损的梨样品横放在小型支架上,提升支架使探头与梨的赤道部位紧密接触,测量该处 20~4500 MHz 间 201 个频率下的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$ 。随后在果实赤道上间隔约  $90^\circ$  选取另外 3 点进行测量。4 点处介电参数的平均值作为该样品介电参数的测量结果。

#### 1.2.2 生理参数的测定

将每次所用梨样品分为 2 组,每组的 2.5 kg,分别放于体积为 9.8 L 的呼吸室中,密闭 1 h 后,连续采样 3 次,测量乙烯释放量和呼吸强度。6 次测量的平均值作为乙烯释放量和呼吸强度的测量结果。乙烯释放量和呼吸强度的具体测量方法见参考文献<sup>[2]</sup>。

#### 1.2.3 硬度测定

用水果削皮刀消去介电参数测量点处的果皮,然后用 GY-3 型果实硬度计(艾德堡仪器有限公司,乐清,中国)测量果肉硬度。4 个点处的硬度平均值作为该样品的测量结果。

#### 1.2.4 可溶性固形物含量的测定

在每个硬度点附近,取适量果肉放于家用压蒜器中,用 PR101 $\alpha$  型数字折射仪(Atago Co. Ltd., 东京,日本)测量挤出梨汁的 SSC。4 点测量的平均值作为 SSC 测量结果。

#### 1.2.5 含水率测定

于果实赤道部位均匀地取完整果肉约 5 g,放于铝盒中,置于  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱(天津泰斯特仪器有限公司,天津,中国)下 24 h。根据原始质量和干燥后质量,计算样品的湿基含水率。两次重复的平均值为测量结果。

试验中,依次测量生理参数(乙烯释放量和呼吸强度)、介电参数( $\epsilon'$  和  $\epsilon''$ )、硬度、SSC 和含水率。所有测量均在室温( $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ )下完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 频率对生长发育后期梨介电参数的影响

图 1 所示是频率对生长发育后期室温下梨  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  的影响规律。图 1 说明,在 20~4500 MHz 的频率范围内, $\epsilon'$  随频率的增大而单调递减,尤其当频率小于 100 MHz 时, $\epsilon'$  随频率的增大迅速减小。在整个频段内, $\epsilon''$  在 25 MHz 左右存在极大值,而在约 1300 MHz 时存在极小值。

表 1 生长发育后期梨在某些频率及室温下的介电参数值

Table 1 Permittivity values of pears during the late growth stage under several selected frequencies at room temperature

测试日期	27 MHz		41 MHz		915 MHz		2450 MHz	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$
7~25	58.3±6.2 <sup>a*</sup>	21.3±2.2 <sup>a</sup>	51.1±5.5 <sup>a</sup>	19.6±2.2 <sup>a</sup>	32.8±2.3 <sup>a*</sup>	4.76±0.50 <sup>a</sup>	31.5±2.2 <sup>a</sup>	5.18±0.34 <sup>a</sup>
8~04	42.2±3.8 <sup>b</sup>	14.5±2.1 <sup>b</sup>	37.8±3.3 <sup>b</sup>	13.1±1.9 <sup>b</sup>	25.9±1.6 <sup>bc</sup>	3.70±0.42 <sup>b</sup>	24.9±1.5 <sup>bc</sup>	4.25±0.32 <sup>b</sup>
8~15	41.6±3.5 <sup>b</sup>	13.6±1.8 <sup>c</sup>	37.2±2.9 <sup>b</sup>	12.3±1.6 <sup>bc</sup>	26.29±1.4 <sup>b</sup>	3.43±0.41 <sup>c</sup>	25.34±1.4 <sup>b</sup>	4.12±0.28 <sup>b</sup>
8~26	40.2±3.6 <sup>b</sup>	12.8±1.6 <sup>cd</sup>	36.0±3.0 <sup>b</sup>	11.7±1.6 <sup>cd</sup>	25.9±1.3 <sup>bc</sup>	3.14±0.38 <sup>d</sup>	25.17±1.3 <sup>b</sup>	3.81±0.29 <sup>c</sup>
9~08	36.1±3.3 <sup>c</sup>	11.3±1.7 <sup>e</sup>	32.6±2.4 <sup>c</sup>	10.3±1.4 <sup>e</sup>	24.73±1.4 <sup>d</sup>	2.78±0.34 <sup>e</sup>	24.01±1.3 <sup>cd</sup>	3.43±0.31 <sup>e</sup>
9~19	36.6±3.1 <sup>c</sup>	11.8±1.9 <sup>de</sup>	32.9±3.8 <sup>c</sup>	10.3±2.2 <sup>e</sup>	24.74±1.9 <sup>d</sup>	2.86±0.40 <sup>e</sup>	23.95±1.8 <sup>d</sup>	3.68±0.36 <sup>cd</sup>
9~28	37.9±3.2 <sup>c</sup>	12.7±1.8 <sup>de</sup>	33.9±2.5 <sup>c</sup>	11.1±1.7 <sup>de</sup>	25.4±1.3 <sup>cd</sup>	2.82±0.27 <sup>e</sup>	24.66±1.3 <sup>bcd</sup>	3.55±0.28 <sup>de</sup>

注: \*同列数值中标注相同字母的表示它们在 5% 的水平下无显著差异。

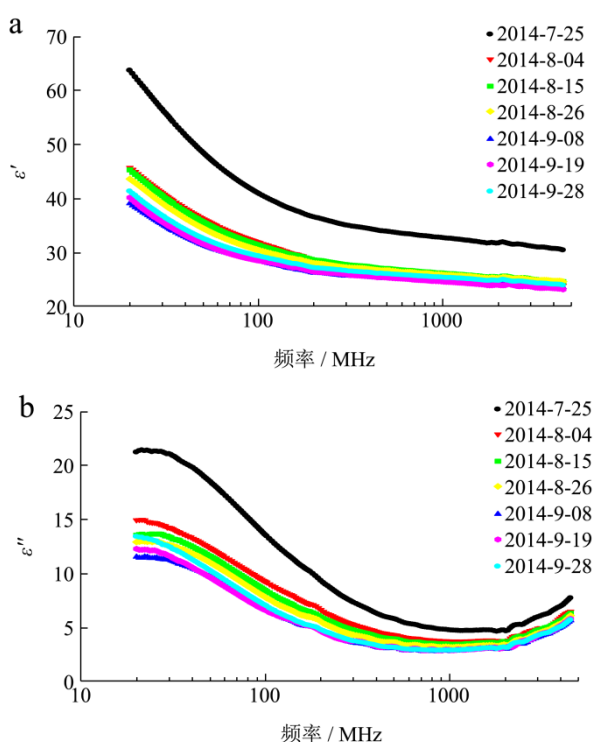


图 1 频率对生长发育后期梨室温下介电参数的影响

Fig.1 Permittivity values of pears during the late growth stage under several selected frequencies at room temperature

注: a: 相对介电常数, b: 介质损耗因数。

由图 1 可以看出, 不同时间下梨的介电参数随频率变化的规律保持一致, 但是介电参数的值有差异。尤其 7 月 25 日采摘的梨在整个频率范围内都具有最大的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$ , 且远大于其他各次的测量值。表 1 给出了生长发育后期梨在某些频率及室温下的介电参数值。结合图 1 和表 1 可以看出, 随着时间的推移,  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  逐渐减小。在 9 月 8 日, 27、41 和 915 MHz 下的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  以及 2450 MHz 下的  $\epsilon''$  达到最小值, 随后又逐渐增大。在 5% 的显著水平下, 同一频率下介电参数值的显著性差异情况不同。有

些存在显著差异, 有些差异不显著。尤其对于 9 月份的三次测量, 在大多数频率下,  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  没有显著差异, 说明梨内部成分的变化没有对其宏观的介电参数值产生显著的影响。

## 2.2 生长发育后期梨内部品质的变化

表 2 生长发育后期梨内部品质的测量结果

Table 2 Internal quality values of pears during the late growth stage

测试日期	硬度/(kg/cm <sup>2</sup> )	含水率/%	SSC/%
7~25	4.96±0.52 <sup>d*</sup>	88.2±0.9 <sup>e</sup>	9.4±0.8 <sup>a</sup>
8~04	6.49±0.72 <sup>a</sup>	88.7±0.5 <sup>de</sup>	9.3±0.4 <sup>a</sup>
8~15	6.11±0.56 <sup>b</sup>	89.0±0.8 <sup>cd</sup>	9.2±0.5 <sup>a</sup>
8~26	5.76±0.58 <sup>c</sup>	89.4±1.1 <sup>bc</sup>	9.0±1.2 <sup>a</sup>
9~08	5.46±0.6 <sup>c</sup>	89.9±0.6 <sup>b</sup>	8.7±0.5 <sup>a</sup>
9~19	4.81±0.46 <sup>d</sup>	89.5±1.3 <sup>bc</sup>	9.2±1.2 <sup>a</sup>
9~28	4.66±0.66 <sup>d</sup>	90.6±0.8 <sup>a</sup>	8.2±0.7 <sup>b</sup>

注: \*同列数值中标注相同字母的表示它们在 5% 的水平下无显著差异。

表 2 给出了生长发育后期梨果肉的硬度和含水率以及果汁 SSC 的变化情况, 并给出了各次测量值在 5% 水平下的显著性差异情况。由表 2 可以看出, 硬度随采摘时间的推移呈现先上升后下降的规律, 含水率逐渐增大, 而 SSC 逐渐减小。尤其对于 SSC, 前 6 次的测量结果没有显著性差异, 说明 SSC 的变化很小, 而最后一次的 SSC 值明显小于其他各次, 且与其他各次间均有显著差异。

果实 在生长发育过程中, 生命活动的作用将淀粉转化为糖。果实的含糖量原则上应随着成熟度的增加而增大, 但 2013 年陕西关中地区的 7、8 月份阴雨天较多, 气温较往年低、光照不充分、降雨量大, 影响了糖的合成和积累。降雨使得果实内自由水含量增加, 从而稀释了糖的浓度。同时, 光照不足以及温差较小



等都将使得果实内部物质的转化受到影响,因此,淀粉水解得到的糖量会变小。此外,呼吸作用使细胞中的淀粉、糖和有机酸被分解为二氧化碳、水和其它可被细胞用于合成反应的小分子物质。生长发育后期 SSC 无显著差异的现象也报于对其他品种梨<sup>[15]</sup>以及苹果<sup>[2]</sup>内部品质的研究中。随着时间的推移,果实逐渐成熟乃至衰老,决定果实硬度的果胶、纤维素和半纤维素含量减小,从而导致果肉硬度逐渐减小。

### 2.3 生长发育后期梨生理特性的变化

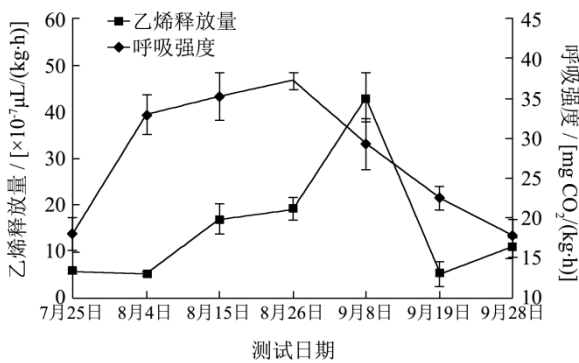


图 2 梨乙烯释放量和呼吸强度的变化

Fig.2 Changes in the amount of released ethylene and respiration intensity of pears

图2是生长发育后期梨乙烯释放量和呼吸强度的变化规律。由图2可以看出,在8月26日之前,乙烯释放量随时间推移缓慢增长,但从8月26日到9月8日增大迅速,到9月8日达到峰值,随后又迅速地减小。呼吸强度在实验初期迅速增大,随后缓慢增大,到8月26日达到峰值,随后又迅速减小。梨的呼吸高峰出现在乙烯释放高峰之前。比较表1和图2发现,27、41和915 MHz下的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  以及2450 MHz下的  $\epsilon''$  的变化规律均与乙烯释放量的变化规律相反。乙烯能增加细胞膜的透性<sup>[16]</sup>。细胞膜透性的增加使细胞之间及细胞内部的导电能力增强。此外,在呼吸作用下,果实内部的碳水化合物等被分解成水及其他小分子物质。果实内自由水含量的变化是引起介电参数变化的主要原因之一。细胞膜透性的增加和自由水含量的增大等一系列变化的共同结果使  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  持续减小。但在呼吸高峰和乙烯释放高峰之后,  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  虽有增大趋势,但各次之间的差异不显著。由此说明,介电特性是生理特性变化的结果,宏观介电参数可用于说明梨内部的生理变化。

图2也说明梨属于呼吸跃变型果实。在呼吸高峰之后,梨进入衰老阶段,耐藏性将变差。表1中,8月份3次测量的介电参数值在多数频率下无显著性差异,且此期间梨具有较高的硬度和含水率,而9月份

三次采摘的梨已进入衰老阶段,说明本研究中梨的最佳采收期应是8月中下旬。由于果实的采收时间受到光照、温度、降雨量等多种因素的影响,因此提供判别果实是否发育成熟的量化参数将有助于果实的适时采收。本研究中,对于“砀山酥”梨,可以以某一频率下的介电参数值,如27 MHz下的  $\epsilon'$  (约为41) 或者  $\epsilon''$  (约为13) 作为判断梨是否发育成熟的指标。

### 2.4 介电参数与内部品质的关系

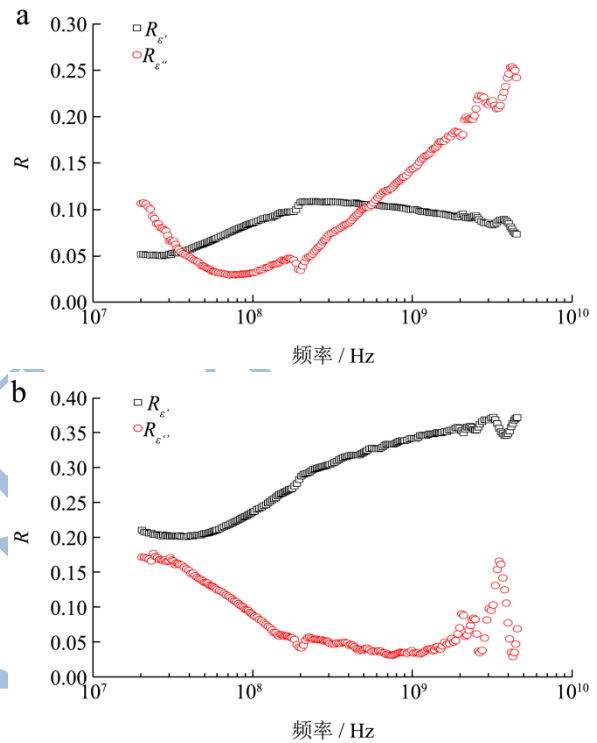


图 3 20~4500MHz 间 201 个频率下的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  分别与 SSC(a) 和硬度 (b) 的线性相关系数

Fig.3 Linear correlation coefficients of  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  with SSC and firmness at 201 frequencies ranging from 20 to 4500 MHz

注: a: SSC, b: 硬度。

为了探索介电参数与内部品质的关系,建立了201个频率下的  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  分别与 SSC 和硬度的线性关系式:  $y=ax+b$ , 其中,  $y$  表示  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$ ,  $x$  表示 SSC 和硬度,  $a$  和  $b$  为回归系数。所得到的 20~4500 MHz 间 201 个频率下的线性相关系数如图 3 所示。图 3 说明  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  分别与 SSC 的线性相关系数  $R_{\epsilon'}$  和  $R_{\epsilon''}$  小于 0.26, 分别与硬度的线性相关系数小于 0.37。对于 SSC, 其与  $\epsilon''$  在大于 1000 MHz 的高频段具有较高的相关系数; 而对于硬度, 在整个频率范围内,  $\epsilon'$  与硬度的相关系数  $R_{\epsilon'}$  均高于  $\epsilon''$  与硬度的相关系数  $R_{\epsilon''}$ , 且其最大值也出现在高频端。但是无论是  $\epsilon'$  还是  $\epsilon''$ , 其与 SSC 和硬度的线性相关

性都很差,说明很难用某一频率下的  $\varepsilon'$  或者  $\varepsilon''$  预测梨的内部品质。此外,研究中发现 SSC 与含水率 MC 有较好的负线性相关性,可用  $MC = -1.107SSC + 99.30 (R = 0.892)$  描述二者的关系。

图 4 是测量 MC 与 SSC 的关系图。

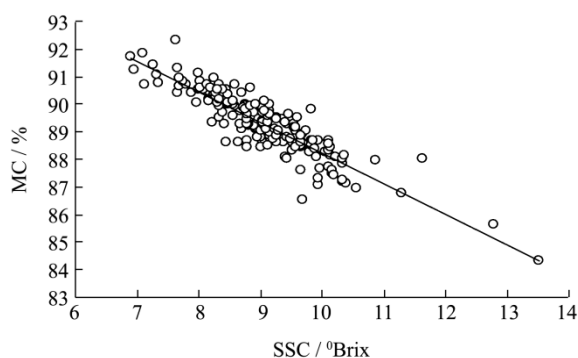


图 4 梨的含水率与可溶性固形物含量的关系

Fig.4 Relationship between moisture content and soluble solid content of pears

### 3 结论

3.1 在 20~4500 MHz 的频率范围内,  $\varepsilon'$  随着频率的增加而减小,且当频率小于约 100 MHz 时  $\varepsilon'$  减小迅速;  $\varepsilon''$  在 25 MHz 附近存在极大值,在约 1300 MHz 时存在极小值。

3.2 梨属于呼吸跃变型果实,且呼吸高峰出现于乙烯释放高峰之前。在乙烯释放高峰出现之前,梨的  $\varepsilon'$  和  $\varepsilon''$  随生长发育时间的推移而增大,在乙烯释放高峰之后,  $\varepsilon'$  和  $\varepsilon''$  增加不显著。可以根据某一频率下  $\varepsilon'$  或  $\varepsilon''$  的值确定梨是否成熟,从而确定梨的最佳采收期。

3.3 生长发育后期,梨的硬度和可溶性固形物含量总体随着时间的推移而减小,而含水率逐渐增大。 $\varepsilon'$  和  $\varepsilon''$  与内部品质参数 (SSC 和硬度) 的线性关系很弱,很难应用单一频率下的介电参数值预测梨的内部品质。梨的含水率和 SSC 具有较好的线性相关性。

3.4 本研究说明梨的介电特性是生理特性变化的结果,是内部物质成份变化的反映,可以依据介电参数值判断梨是否发育成熟。研究结果对开发基于介电特性的便携式水果成熟度无损检测仪具有指导意义。选择对梨内部品质敏感的频率,建立基于多频率下的介电参数值预测梨内部品质的非线性模型将是后期研究的重点内容。

### 参考文献

[1] 郭文川.果蔬介电特性研究综述[J].农业工程学报,2007,

23(5):284-289

GUO Wen-chuan. Review of dielectric properties of fruits and vegetables [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 284-289

[2] 郭文川,朱新华,邹养军.苹果果实成熟期间电特性的研究[J].农业工程学报,2007,23(11):264-268

GUO Wen-chuan, ZHU Xin-hua, ZOU Yang-jun. Electrical properties of apples during ripening [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 264-268

[3] 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 Wen-chuan, ZHU Xin-hua, GUO Kang-quan. Relationship between electrical properties and physiological properties of postharvest apples and its application [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 136-139

[4] GUO Wen-chuan, ZHU Xin-hua, NELSON S O, et al. Maturity effects on dielectric properties of apples from 10 to 4500 MHz [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 224-230

[5] 唐燕,杜光源,张继澍.猕猴桃电特性与生理特性关系研究[J].农业机械学报,2012,43(3):97-102

TANG Yan, DU Guang-yuan, ZHANG Ji-shu. Relationship between electrical properties and physiological characteristics of kiwifruit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(13): 97-102

[6] 郭文川,陈克克.桃 10-4500 MHz 间的介电特性与内部品质关系分析[J].农业机械学报,2010,41(3):134-138

GUO Wen-chuan, CHEN Ke-ke. Relationship between dielectric properties from 10 to 4500 MHz and internal quality of peaches [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 134-138

[7] 商亮,谷静思,郭文川.基于介电特性及 ANN 的油桃糖度无损检测方法[J].农业工程学报,2013,29(17):257-264

SHANG Liang, GU Jing-si, GUO Wen-chuan. Non-destructively detecting sugar content of nectarines based on dielectric properties and ANN [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(17): 257-264

[8] GUO Wen-chuan, 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

[9] 郭文川,商亮,王铭海,等.基于介电频谱的采后苹果可溶性固形物含量无损检测[J].农业机械学报,2013,44(9):

- 132-137  
GUO Wen-chuan, SHANG Liang, WANG Ming-hai, et al. Soluble solids content detection of postharvest apples based on frequency spectrum of dielectric parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(19): 132-137
- [10] 蔡骋, 李晓龙, 马惠玲, 等. 基于生物阻抗特性的苹果新鲜度无损测定[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 147-152  
CAI Cheng, LI Xiao-long, MA Hui-ling, et al. Non-destructive detection of freshness grade for apple fruit based on bio-impedance properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 147-152
- [11] 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  
ZHOU Yong-Hong, HUANG Sen, ZHANG Ji-Shu, et al. Study on the post-harvest dielectric properties of persimmon fruit [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008, 36(4): 117-122
- [12] NELSON S O, GUO Wen-chuan, TRABELSI S. et al. Dielectric properties of watermelons for quality sensing [J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18: 1887-1892
- [13] 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
- [14] 刘亚平, 刘兴华, 李红波. 葡萄冷藏中电学参数与质地特性变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 343-348  
LIU Ya-ping, LIU Xing-hua, LI Hong-bo. Law of dielectric parameters and texture properties for grape during cold storage [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 343-348
- [15] 施泽彬, 戴美松, 孙田林, 等. 翠冠与玉冠梨果实发育过程中色素、糖、酸累积特性研究[J]. 果树学报, 2007, 24(6): 833-836  
SHI Ze-bin, DAI Mei-song, SUN Tian-lin, et al. Comparative studies on the accumulation process of the pigments, sugar and acid in fruit of cuiguan and yuguan pear cultivars [J]. Journal of Fruit Science, 2007, 24(6): 833-836
- [16] 刘兴华, 饶景华. 果品蔬菜贮运学. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998