

# 果蔬介电特性研究综述

郭文川

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

**摘 要:** 对食品介电特性的研究, 不仅能使人们了解食品的射频或微波特性, 研发出最具节能效果的介电加热设备, 而且介电特性可用于食品品质的识别。为此, 以果蔬为对象, 概述了果蔬生物体的介电特性; 介绍了测试信号的频率和电压以及环境温度和湿度等测试条件对果蔬介电特性的影响; 综述了在果蔬含水率、成熟度、新鲜度、损伤和糖、酸度等品质因素对介电特性影响方面的研究进展; 并指出目前研究存在的问题和今后的研究方向。

**关键词:** 果品; 蔬菜; 介电特性; 介电常数; 介质损耗因子; 品质

中图分类号: S183

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)5-0284-06

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 Wenchuan. Review of dielectric properties of fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 284-289. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

自从 1953 年第一篇关于谷物介电特性<sup>[1]</sup>的数据发表以来, 越来越多的科技工作者投入到农产品, 尤其是食品介电特性的研究中。微波加热便是其研究成果的充分体现。人们对食品物料介电特性感兴趣的原因主要在于两个方面。首先, 在介电加热处理和烹调中, 介电特性在很大程度上决定了处于高频或微波电场中的物料行为, 因此, 对物料介电特性的研究不仅使得人们能够了解其射频或微波特性, 而且对介电加热设备的研发具有重要的作用。第二, 物质的介电特性决定于其组织成分等。当将介电特性与组织成分, 如, 含水率等相联系时, 介电特性可用于测量其含量。因此, 可以利用介电特性识别物质的含水率、新鲜度等品质因素。这对研发新的测量方法和测量设备具有非常重要的意义。

果蔬是一种主要的食品。影响果蔬介电特性的因素较多, 但概括起来主要包括两方面的因素: 测试条件和果蔬品质。了解测试条件, 尤其是测试信号的频率和环境温度对果蔬介电特性的影响规律对于介电加热果蔬, 研究介电加热设备意义重大。研究果蔬品质对介电特性影响的目的在于探索基于介电特性识别果蔬品质, 例如, 含水率、成熟度、新鲜度、损伤以及糖、酸度等的新方法。目前, 研究介电特性与果蔬品质的关系, 探索基于介电特性无损评定果蔬品质方法的已被越来越多的科研

工作者所关注。

## 1 果蔬生物体的介电特性

Nelson 将物质的电特性分成两大类——主动电特性和被动电特性。主动电特性是物料自身内部存在着某种能量, 从而产生电动势或电位差。例如, 生物系统中的生物电位差或者应力电位以及在压电晶体中观察到的电现象等。被动电特性是指影响电磁场的分布以及物料所在场电流的特性。他们也可能影响处于电磁场中物质的行为。被动电特性是由物质的化学成分、分子结构等所决定的物质的固有特性。主动和被动特性不仅取决于物质的本质特性, 而且也受环境的影响<sup>[2]</sup>。

果蔬是介于导体和绝缘体之间的电介质, 在外电场的作用下呈现出一定的介电特性。因此经常采用介电常数描述该介电特性。但实际中, 常用物质的相对介电常数(绝对介电常数与真空介电常数的比值)描述其介电特性。

物质的复数相对介电常数为:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \frac{\epsilon_r'}{\epsilon_0} - j\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_0}$$

式中  $\epsilon_0$ ——真空时的介电常数,  $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ;  $\epsilon_r'$ ——复数绝对介电常数的实部;  $\epsilon_r''$ ——复数绝对介电常数的虚部;  $\epsilon_r$ ——复数相对介电常数;  $\epsilon_r'$ ——复数相对介电常数的实部, 称为介电常数;  $\epsilon_r''$ ——复数相对介电常数的虚部, 称为介质损耗因子。

通常, 物质的介电常数反映了物质储存电场能量的能力, 而介质损耗因子反映物质消耗电场能量的能力。另外, 也常用损耗角正切反映能量损失特性(为介质损耗角)<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2006-06-16 修订日期: 2006-10-18

基金项目: 西北农林科技大学博士科研启动项目(01140502)

作者简介: 郭文川(1969-), 女, 陕西临潼人, 博士, 副教授, 主要从事农产品介电特性的研究。杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100。Email: guowenchuan69@126.com

从20世纪70年代开始,国内外的学者开始致力于果蔬生物体介电特性的研究,并取得了一定的研究成果。

## 2 测试条件对果蔬生物体介电特性的影响

测试条件主要包括测试信号(频率和电压)和测试环境(环境温度和湿度)两个方面。

### 2.1 测试信号对果蔬介电特性的影响

测试信号频率是影响果蔬生物体介电特性的主要因素,除此之外,电压也对某些果蔬介电特性有较大的影响。

#### 2.1.1 频率的影响

从20世纪70年代起,频率对果蔬介电特性的影响一直倍受关注,这些研究为微波加热食品中能量的有效利用和微波加热设备的研制具有重要作用。但各自的研究频率范围存在差异。随着测试手段的改进,越来越多的研究集中在射频和微波下。

在0.1 G~10 GHz的微波下,未加工的土豆、胡萝卜、苹果等果品的介电常数和介质损耗因子是频率的函数<sup>[3]</sup>。Nelson等(1994)<sup>[4]</sup>利用网络分析仪以及末端开口的同轴探针测量了常温下23种新鲜水果和蔬菜的果肉在200 MHz~20 GHz频段内的介电特性。说明介电常数随着频率的增加而稳定减小。指出低频下导致果蔬组织介电特性差异的原因可能在于离子的传导率和束缚水的松弛,而在高端频率下,出现差异的原因在于自由水的松弛。随后,又利用阻抗分析仪测量了10 MHz~1.8 GHz下苹果、鳄梨、香蕉、香瓜、胡萝卜、黄瓜、葡萄、橙子和土豆等9种切片水果和蔬菜样品的介电常数和介质损耗因子。果蔬的介电常数从10 MHz下的几百降到1.8 GHz下的100以下<sup>[5-7]</sup>。图1为频率对脐橙介电常数的影响<sup>[7]</sup>。Ikediala等(2000)<sup>[8]</sup>研究了30 MHz~3 GHz范围内,频率对4个品种苹果果肉介电参数的影响。也发现随着频率的增加,介电常数减小,最小的介质损耗因子出现在915 MHz。笔者采用LCR电桥测量仪和平板电极系统测量5~150 kHz低频下,频率对完好无损果品和蔬菜介电特性的影响。图2为1.0 V下,频率对苹果、猕猴桃和梨的电容值的影响。图示说明,随着频率的增大,果品的电容值减小。但不同种类的果蔬,由于组织成分、组织结构和含水率的不同,使得随着频率的增大,电容值减小的速率不同,该差异为基于介电特性识别果蔬种类提供了可能<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.2 电压的影响

除了测试信号频率对介电特性的影响之外,笔者发现信号电压对果蔬介电特性也有影响,且影响规律不同。图3为10 kHz下,电压对苹果、梨和猕猴桃的损耗

角正切的影响。结果表明,信号频率一定时,果品损耗角正切随信号电压而变,且存在电压临界值。当信号电压小于该临界值时,电容和损耗角正切值保持不变,当信号电压大于临界值时,电容值随电压的增加呈反比例减小,损耗角正切值随电压的增加呈正比例增大,如图3所示。根据电压临界值的不同,提出了基于介电特性的果品种类识别方法<sup>[10]</sup>。另外,试验也发现,电压对番茄、桃子等果蔬的介电特性没有影响。

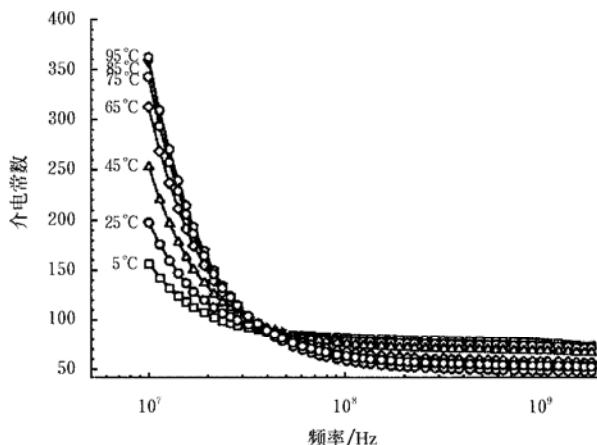


图1 不同温度下频率对脐橙介电常数的影响

Fig. 1 Influences of frequency on dielectric constant of navel orange at different temperatures

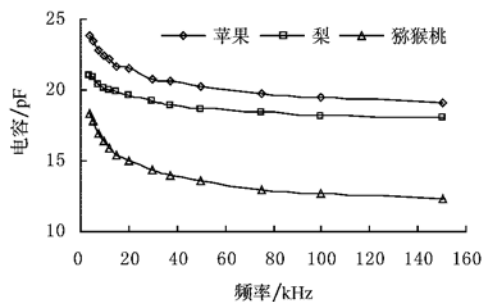


图2 频率对果品电容的影响

Fig. 2 Influences of frequency on capacitance of different fruits

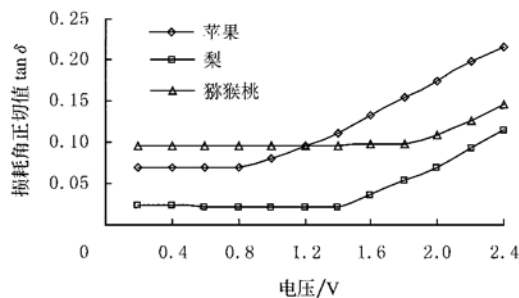


图3 电压对果品损耗角正切值的影响

Fig. 3 Influences of voltage on loss angle tangent different of fruits

## 2.2 环境温度和湿度的影响

环境温度会影响果蔬组织内带电粒子的运动,而环境湿度会影响果蔬表面的水分状况,这些变化皆对介电参数值有一定的影响。

Stuchly (1970)<sup>[11]</sup>发现,当土豆粉很干时,温度(-20~120℃)与复介电常数的实部和虚部两者均未发现有相关性。但是,当自由水存在时,温度与复介电常数的相关性随着含水率的增加也迅速增大。Funebo 等(1999)<sup>[12]</sup>研究表明,2.8 GHz 下,温度和湿度对苹果、草莓、山萝卜、蘑菇等果品和蔬菜的介电常数和介质损耗因子有影响。Ikediala 等(2000)<sup>[8]</sup>观察到在5~55℃,30 MHz~3 GHz 下,苹果介电常数随温度升高略有减小,而介质损耗因子在射频范围内随着温度的升高线性增加,但在微波频率下,几乎保持不变。Sipahioglu 等(2003)<sup>[13]</sup>研究了2.45 GHz,5~130℃时15种果蔬的介电特性。发现在该微波频率下,随着温度的增加,果蔬的介电常数减小,但是介质损耗因子先升后降。Nelson (2003)<sup>[5]</sup>的研究结果表明在5~95℃下,9种果蔬组织的介质损耗因子普遍随着温度的增加而增加。在10 MHz~1.8 GHz 内,低频下介电常数随着温度升高而增加,高频下随着温度升高而减小,该转折点出现在10~100 MHz 之间,如图1所示。作者认为当频率低于该点时,离子传导决定介电行为,但是当高于该点时,偶极子的松弛似乎控制着介电行为。在10~300 MHz,5~65℃范围内,这9种果蔬组织的介质损耗因子可以根据下式计算:

$$\log \epsilon'' = \alpha_0 + \alpha_1 \log f + \alpha_2 T$$

式中  $T$ ——温度;  $f$ ——频率;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ——系数,其值由果品种类决定。该数据为果蔬介电加热提供了新的有用信息<sup>[6,7]</sup>。

测试条件对果蔬介电特性的影响为了解果蔬的介电加热特性奠定了基础。

## 3 果蔬品质对介电特性的影响

为了能将介电特性应用于果蔬品质的识别中,人们研究果蔬的各项品质,例:含水率、成熟度、新鲜度、损伤、含糖量和酸度等对果蔬介电特性的影响,了解其影响规律,探索其应用前景。

### 3.1 含水率的影响

含水率是影响果蔬介电特性的一个重要因素,是了解果蔬新鲜程度和品质的重要指标,是果蔬分级和储藏加工时的重要参数,也是介电加热物品时必须了解的一个指标。

9.4 GHz 下含水率与土豆粉介电常数的关系说明,只要材料的吸附力较高,介电常数就会随着含水率的增

加而缓慢地增加<sup>[11]</sup>。Nelson(1980)<sup>[14]</sup>在2.45 GHz,23℃下测量了桃子、红薯、土豆、苹果、香瓜和胡萝卜果肉的介电常数和损耗因子。实验表明介电参数与含水率有关。在150 MHz~6.4 GHz 下,苹果、香蕉、桃子和柑橘等果品果肉和果皮的介电特性不相同。该差异的主要原因在于含水率的不同<sup>[15]</sup>。Nelson(1992)<sup>[16]</sup>测量了3种新鲜洋葱的介电常数和介质损耗因子的平均值,认为这些数据可用于洋葱的微波处理或含水率的测量中。从对4%~87.5%含水率范围内的Red Delicious(红富士)苹果的介电常数和介质损耗因子的研究结果中,Feng 等(2002)<sup>[17]</sup>指出在高含水率(>70%)下,自由水传播和离子传导是介电行为的主要原因;在中等含水率下(约23%),离子传导起主要作用;在低含水率下(约4%),束缚水是主要的传播途径。而含水率的减小导致了介电常数和损耗因子的减小。Kraszewski 等(2004)<sup>[18]</sup>对在频域和时域下农产品,包括种子、植物、谷物、果蔬、肉的微波介电特性测量技术进行了总结。说明这些物品的介电常数和损耗因子依赖于物质的含水率。

### 3.2 成熟度的影响

果蔬在成熟过程中,其内部发生生理、生化变化。这些变化都反映和伴随着物质和能量的转换,导致生物组织内各类物质所带电荷在空间分布上的变化,从而会影响果蔬的介电特性。

在300~900 kHz 的频率范围内,未成熟苹果的介电常数值在全频率范围内几乎不变,而成熟苹果的介电常数值则随着频率的增加从34左右下降到20附近<sup>[19]</sup>。Wolf 等(1973)<sup>[20]</sup>也发现,当苹果成熟时,介电常数和介质损耗因子有较为明显的变化。Derell 等(1971)<sup>[21]</sup>利用介电参数研究了桃子的成熟度指标。Nelson 等(1995)<sup>[22]</sup>测量了0.2~20 GHz 范围内,不同成熟阶段下3种新鲜桃子的介电参数。观察到不同成熟阶段桃子的介电参数存在差异,且随品种而变。200 MHz 下的介电常数和10 GHz 下的介质损耗因子可应用于桃子成熟度的辨别。

在果蔬成熟过程中,光照、降雨量、温度等多种自然因素会影响果蔬的生理特性,从而影响其介电特性。因此,成熟过程中果蔬介电特性的研究比较复杂,进展缓慢。

### 3.3 新鲜度的影响

采后果蔬最主要的代谢过程是呼吸作用。在呼吸作用下,淀粉、糖和有机酸等碳水化合物逐步被分解为二氧化碳、水或其它小分子物质。水是影响果实介电参数变化的主要因素。水以及果实内部其它一系列的生理生化变化皆导致果实内部空间电荷的变化,在外电场作用

下, 将影响果实的宏观介电参数值。对采后果蔬介电特性的研究取得了较大的成绩, 但研究对象主要集中于苹果、桃等主要果品中。

Kato(1987)<sup>[23]</sup>指出利用果品的电阻抗特性可以无损检测果品的品质。在 100 Hz~ 100 kHz 频段内, 苹果新鲜度降低, 但未腐烂时, 其果肉阻抗趋于增加, 相对介电常数和介质损耗因子下降<sup>[24, 25]</sup>。张立彬等(1996)<sup>[26]</sup>也得出在 10~ 100 kHz 的频率范围内, 随着金帅苹果新鲜度的降低, 苹果果肉的等效阻抗增大, 而介电常数和介质损耗因子下降。随后(2000年), 又利用 LCR 测试仪无损测定了不同品质苹果介电特性的差异, 认为介电常数可用于判断水果内部品质<sup>[27]</sup>, 并指出等效电容可作为苹果的分类变量<sup>[28]</sup>。其进一步对完好无损苹果的等效电容、相对介电常数、损耗因子和等效阻抗几项介电参数的研究结果指出, 苹果的内部品质和外形尺寸与其介电特性之间均存在联系<sup>[29]</sup>。笔者也以苹果(红富士)为对象, 从生理生化角度分析了介电特性与生理特性的关系。发现采后苹果介电常数的变化规律与乙烯释放量变化规律相似, 电阻率与乙烯释放量变化规律相反, 在乙烯释放峰出现时, 介电常数达到最大值, 电阻率达到最小值, 并从生理角度分析介电参数变化的原因, 同时将介电特性用于苹果新鲜等级的识别中<sup>[30]</sup>。

胥芳等(1997年)<sup>[31]</sup>对采后桃子的研究结果说明, 随着桃子储藏时间的增加, 桃子的等效阻抗增大而介电常数和介质损耗因子减小, 桃子在开始腐烂时, 介电特性有一个较大的反复。指出在 12~ 100 kHz 的频段内, 桃子的最佳测试频段为 15 kHz 以下。另外, 研究了介电式水果品质分级机的原理<sup>[32]</sup>。叶齐政等(1999)<sup>[33]</sup>提出根据桃子、番茄和芒果等效阻抗的特征频率变化判断水果的成熟度。

研究采后果蔬介电特性的变化, 不仅有助于了解采后介电特性的变化规律和变化机理, 而且为基于介电特性研发采后果蔬品质识别仪具有重要的意义。

### 3.4 损伤的影响

果蔬在采收后经常会发生腐烂, 这些腐烂有些始自果蔬生长期间病菌的侵染, 有些则由于果蔬在采收和采后处理过程中造成的伤口被病原菌侵染而发生。腐烂果蔬产生的乙烯能加快一起储藏的其它果蔬的后熟和衰老, 同时污染其它健康产品。因此, 剔除损伤果是果实品质检测中的一道必不可少的工序。科技工作者试图了解损伤对果蔬介电特性的影响, 探索介电特性在检测损伤果蔬中的应用前景。

张立彬等(2000)<sup>[27]</sup>对秦冠苹果研究发现, 在适当的频率范围内, 介电常数与苹果的腐烂程度有较好的相关性, 认为介电常数可用于评价苹果的内部品质。当施

加信号的频率在 33~ 100 kHz 的范围内时, 可以取得理想的区分效果。Wang 等(2005)<sup>[34]</sup>用末端开口的同轴探针技术测量了在 20℃ 和 60℃ 时, 1 MHz~ 1.8 GHz 下 6 种热带和亚热带水果以及 4 种相关虫害的介电特性。发现在温度一定时, 在所有试验频率下, 昆虫的介质损耗因子一般比其所在果品的介质损耗因子大。这对识别果蔬的虫害有帮助作用。笔者研究了撞击和静压损伤对苹果介电参数的影响。结果表明, 在苹果发生损伤后 0.5 h 内, 其介电常数和电阻率急剧变化, 随后, 迅速恢复, 3 h 后趋于稳定, 而同期无损苹果的介电常数和电阻率基本保持不变; 储藏期间, 撞击损伤苹果的介电常数持续增大并出现跃变; 静压损伤苹果的介电常数迅速增大后保持不变, 而同期无损苹果的介电常数一直保持增大趋势<sup>[35]</sup>。

这些研究为基于介电特性无损分选损伤果实提供了基础。

### 3.5 糖度和酸度的影响

除了以上几方面的研究之外, 人们也试图寻找介电特性与糖度和酸度之间的关系。从对桃子、红薯等多种果蔬介电常数和损耗因子的测量结果中, 没有发现这些果蔬的介电特性与可溶性固形物(糖度)之间的关系<sup>[14]</sup>。Kato(1997)<sup>[36]</sup>对西瓜等的实验研究表明, 含糖量与电阻和电导率等有关系。利用交流电导率进行柑橘和番茄果汁有机酸和含糖量的定量测定理论已经确立, 并正在投入实用阶段。随着苹果成熟度的增加, 硬度和可滴定酸减小, 可溶性固形物含量显著增加, 但 Ikediala 没有发现这些品质与介电参数之间的相关性<sup>[8]</sup>。Nelson(2006)<sup>[37]</sup>研究了 10 MHz~ 1.8 GHz 下蜜瓜(Honeydew melon)果肉的介电常数和介质损耗因子与可溶性固形物含量(SSC)的关系。发现在以介电常数和介质损耗因子分别除以 SSC 时, 介电参数和 SSC 具有很高相关性。1.8 GHz 下的相关系数  $r = 0.96$ 。在已知  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  时, 可以根据式  $SSC = \frac{\alpha \epsilon' \epsilon''}{\alpha_f k}$  ( $k$  和  $\alpha$  是系数) 计算 SSC。

另外, 研究也发现, 灰分含量也影响果蔬的介电参数。随着灰分含量的增加, 介电常数普遍减小, 而介质损耗因子增大<sup>[13]</sup>。

现有的研究表明, 在测试条件一定时, 含水率是影响果蔬介电特性的主要因素。新鲜度、成熟度、损伤等对果蔬介电特性影响的主要原因仍在于果蔬内部含水率的变化。

## 4 问题与展望

在果蔬介电特性的研究方面虽然取得了较大的成

绩,但由于影响果蔬生物体介电特性的因素较多,使得研究进展较慢。笔者认为目前研究存在的主要问题和今后的研究方向应该集中在以下几个方面。

1) 研究内容:大量的研究成果集中于介电加热、微波能应用方面。因此,在测试信号的频率和温度以及果蔬组织含水率对介电特性的影响方面成绩显著。而在基于介电特性识别除含水率以外的果蔬内部品质,例如新鲜度、成熟度、含糖量、酸度等品质或成分方面,研究成果颇少。因此,探索果蔬品质对介电特性的影响,分析影响机理应该是未来工作重点之一。

2) 测试方法:目前在果蔬介电特性测试方面主要采用两种方法。一是采用末端开口的同轴探针与阻抗分析仪或网络分析仪相配合测试介电参数。由于阻抗分析仪和网络分析仪比较昂贵,在国外应用普遍。由于信号源的频率范围比较广,比较高(3 GHz 左右,有的在 20 GHz),所以,可以得到比较详尽的介电特性。但是,频率越高,信号穿透果蔬组织的深度越浅。1.8 GHz 下,穿越深度是 6 mm<sup>[37]</sup>。因而,国外主要测试果肉的介电特性。另一种方法是采用平板电极系统和无损接触测试方法研究低频(100 kHz 左右)下果蔬的介电特性,该方法主要应用于国内。其特点是成本较低,但是测试值的大小受果蔬的大小、形状等影响显著,数据的可靠性较差。为了能将介电特性应用无损识别果蔬品质中,研究简单、精确、成本较低的果蔬介电特性无损测试方法应该成为今后的又一个研究重点。

3) 应用开发:现有的研究成果主要体现在测试方面,在应用结果开发设备方面成果很少。只有实现成果的转化,才能成为真正的生产力。探索将介电特性与日渐成熟并开始应用于水果无损检测中的计算机视觉和图像处理技术相结合的方法,应用信息融合技术建立高精度的果蔬品质无损检测系统是一个很有价值的研究方向。

#### [参 考 文 献]

- [1] Nelson S O, Soderholm L H, Yung F D. Determining the dielectric properties of grain[J]. *Agricultural Engineering*, 1953, 34(9): 608– 610.
- [2] Nelson S O. Electrical properties of agricultural products—A critical review[J]. *Transactions of the ASAE*, 1973, 16(2): 384– 400.
- [3] Tran V N, Stuchly S S, Kraszewski A. Dielectric properties of selected vegetables and fruits 0.1~ 10.0GHz[J]. *The Journal of Microwave Power*, 1984, 19(4): 251– 258.
- [4] Nelson S O, Forbus W Jr, Lawrence K. Permittivities of fresh fruits and vegetables at 0.2 to 20 GHz[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1994, 29(2): 81– 93.
- [5] Nelson S O. Frequency and temperature-dependent permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8GHz[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 567– 574.
- [6] Nelson S O. Dielectric spectroscopy of fresh fruit and vegetable tissues from 10 to 1800MHz[J]. *Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy*, 2005, 40(1): 31– 47.
- [7] Nelson S O. Dielectric spectroscopy in agriculture[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2005, (351): 2940– 2944.
- [8] Ikediala J N, Tang J, Drake S R, et al. Dielectric properties of apple cultivars and codling moth larvae[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(5): 1175– 1184.
- [9] 朱新华,郭文川,郭康权.电激励信号对果品电参数的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(11): 125– 128.
- [10] 郭文川,朱新华,郭康权.基于介电特性的果品种类识别方法的研究[J]. *农业机械学报*, 2005, (7): 164– 166.
- [11] Stuchly S S. Dielectric properties of some granular solids containing water[J]. *The Journal of Microwave Power*, 1970, 5(2): 62– 68.
- [12] Funebo T, Ohlsson T. Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1999, 34(1): 42– 54.
- [13] 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.
- [14] Nelson S O. Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetable[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(5): 1314– 1317.
- [15] Seaman R, Seals J. Fruit pulp and skin dielectric properties for 150 MHz to 6400 MHz[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1991, 26(2): 72– 81.
- [16] Nelson S O. Microwave dielectric properties of fresh onions[J]. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(3): 963– 967.
- [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] Kraszewski A W, Nelson S O. Microwave permittivity determination in agricultural products[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2004, 39(1): 41– 52.

- [19] Thompson D R, Zachariah G L. Dielectric theory and bioelectrical measurements. II. Experimental [J]. Transactions of the ASAE, 1971, 14(2): 214–215.
- [20] Wolf D F, Zachariah G L. Dielectric properties for evaluating apple maturity [J]. Transactions of the ASAE, 1973, 16(5): 895–898.
- [21] Derell M B, Brown R H. Dielectric properties of peaches as maturity index[R]. Paper of ASAE, 1971.
- [22] Nelson S O, Forbus Jr W R, Lawrence K C. Assessment of microwave permittivity for sensing peach maturity[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(2): 579–585.
- [23] Kato K. Nondestructive measurement of fruits quality by electrical impedance[J]. Research Report on Agricultural Machinery, Kyoto University, 1987, (17): 51–68.
- [24] 加藤宏朗. 高周波インピーダンスにとる農産物の非破壊鮮度判定: 第1報[J]. 農業機械学会志, 1988, 50(6): 99–107.
- [25] 加藤宏朗. 高周波インピーダンスにとる農産物の非破壊鮮度判定: 第2報[J]. 農業機械学会志, 1989, 51(5): 55–61.
- [26] 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.
- [27] 张立彬, 胥芳, 贾灿纯, 等. 苹果内部的电特性无损检测研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 104–106.
- [28] Zhang L, Xu F, Ji S, et al. Principle and implementation of automatically nondestructive inspection system for apple internal quality based on dielectric property[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1): 140–145.
- [29] 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.
- [30] 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): 143–146.
- [31] 胥芳, 张立彬, 周国君, 等. 无损检测桃子电特性的实验研究[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 202–205.
- [32] 胥芳, 张立彬, 计时鸣, 等. 介电式水果品质分级机的原理及实现[J]. 浙江大学学报, 2002, 28(3): 325–330.
- [33] 叶齐政, 姚宏霖. 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[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(4): 304–307.
- [34] 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.
- [35] 郭文川. 果蔬生物体电特性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [36] Kato K. Electrical density sorting and estimation of soluble solid content of watermelon [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(3): 161–170.
- [37] Nelson S O, Trabelsi S, Kays S. Correlating honeydew melon quality with dielectric properties [R]. 2006 ASABE Meeting paper. Paper No. 066122, 2006.

## Review of dielectric properties of fruits and vegetables

Guo Wenchuan

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Studying dielectric properties of foods, not only can people understand radio frequency or microwave properties of foods, develop dielectric heating equipment which save most energy, but also can make dielectric properties be applied in evaluating food qualities. Therefore, permittivities of fruits and vegetables were introduced. The influences of test conditions, such as frequency and voltage of signal used in experiment, and environmental temperature and humidity on dielectric properties of fruits and vegetables were summarized. Progresses in studying dielectric properties influenced by qualities, such as water content, maturity, freshness, damage, total soluble solid content, etc., were reviewed. Problems existing in present research and development trends were also given.

**Key words:** fruits; vegetables; dielectric properties; dielectric constant; loss factor; quality