研究论文

DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2018.02.006

芋头的介电特性

宋春芳[1,2]，袁冬明[1,2]，王 燕[1,2]，桑 田[1,2]，余华杰[1,2]，续艳峰[1,2]，崔政伟[1,2]

（1. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 机械工程学院，江苏 无锡 214122）

摘要：利用矢量网络分析仪和末端开路的同轴探头，测量了 30~3 000 MHz 频段内含水（以质量分数表示）分别为 25%、40%、55%、70%、85%的芋头片在 20、40、60 ℃和 80 ℃下的介电特性。研究表明：介电常数与介质损耗因子随频率的增加而降低，介电常数随着含水率的增大而增大；介电常数与介质损耗因子都随着温度的升高而减小；915 MHz 下介电常数与介质损耗因子的数学模型的显著水平均小于 0.000 1，可预测芋头的含水率；同一含水率与温度的芋头片穿透深度随频率的增加而降低，一定频率下的芋头片的穿透深度随温度的增加而增加。

关键词：芋头；介电特性；温度；含水率；频率；穿透深度

中图分类号：S183　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673—1689(2018)02—0153—06

Research of Dielectric Properties of Taro

SONG Chunfang[1,2]，*YUAN Dongming*[1,2]，*WANG Yan*[1,2]，*SANG Tian*[1,2]，*YU Huajie*[1,2]，*XU Yanfeng*[1,2]，*CUI Zhengwei*[1,2]

（1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. School of Mechanical Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：The dielectric properties of taro slices with different moisture content from 25% to 85% at 20，40，60 ℃ and 80 ℃ are measured by the open-ended coaxial-line probe and a network analyzer from 30 to 3 000 MHz.The results show that dielectric constant and dielectric loss factor decrease with the increase of frequency，the dielectric constant increase with the increase of moisture content.the dielectric constant and dielectric loss factor of taro decrease with the increase of temperature.Under the condition of 915 MHz，the mathematical model's levels of significance of dielectric constant and dielectric loss factor are both less than 0.000 1，this result can predict the moisture content of the taro.the taro intake depth of the same moisture content and temperature decreases with the increase frequency，the taro intake depth increases with the increase of temperature under a certain frequency.

Keywords：taro，dielectric properties，temperature，moisture content，frequency，penetration depth

收稿日期：2015-09-18

基金项目：国家自然科学基金项目(21606109，51401086)；江苏省前瞻性联合研究项目(BY2016022-10)。

作者简介：宋春芳(1974—)，女，内蒙古巴盟人，工学博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品工艺与机械方面的研究。E-mail：gracecf927@163.com

引用本文：宋春芳，袁冬明，王燕，等. 芋头的介电特性[J]. 食品与生物技术学报，2018，37(2)：153-158.

芋头,俗称芋、芋艿等。芋头不仅有食用价值还有药用价值,芋头中含有很多矿物质,可以增强人体的体质[1-2]。近年来,随着芋头的种植面积增加,产量也飞速增长,每年产量达 600 万吨,这为芋头的深加工打下了牢固的基础。虽然芋头产量大,现有的加工技术简单粗糙,没有相对深入的加工技术,严重制约芋头的经济效益和开发程度,所以对芋头的进一步开发还有很大潜力[3-4]。主要因素是芋头收获后含水率比较高易腐烂,传统方法是进行晾晒,不仅耗时费力而且对品质影响比较大。因此,亟需一种新的干制方法,但关于芋头的微波干燥特性尚未报道[5]。不同含水率的物料的介电特性是不一样的,含水率越高,介电常数与介电损耗因子就越大。介电损耗因子越大,微波功率吸收能量越多,因此通过介电特性的变化来检测物料干燥过程中的含水率[6-11]。还可以通过介电特性检测食品质量[12-13]。

目前,没有芋头介电特性的研究,并且缺少芋头介电特性与温度、频率等因素之间关系的研究。本文作者以芋头为研究对象,利用矢量网络分析仪和末端开路的同轴探头测量了 30~3 000 MHz 频段内含水率分别为 25%、40%、55%、70%、85%的芋头片在 20、40、60 ℃和 80 ℃下的介电特性,并研究芋头介电特性与影响因素之间的关系,为基于射频、微波介电特性的芋头的含水率检测仪的设计与干燥杀菌提供了基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

芋头购买于无锡当地的超市,要求无损伤、霉斑,形状均匀、大小基本一致,将其洗净去皮切片,切片样品封装在塑料袋中,放于冰箱中 5 ℃冷藏备用。

1.2 实验设备

ARB120 电子天平,梅特勒—托利多仪器上海有限公司产品;E5061B 网络分析仪,美国安捷伦公司产品;HH-601 超级恒温油浴锅,荣华仪器制造有限公司产品;DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏试验设备有限公司产品。

1.3 介电特性的测试方法

为确保实验测量数据准确度,实验前打开 E5061B 网络分析仪进行预热,然后设定频率范围和数据采集点。对分析仪进行精度校准。测量时,测量探头必须干净,探头与芋头样品表面充分接触,通过网络分析仪采集数据,得出材料的介电常数和介质损耗因子值。

1.4 实验步骤

将准备好的样品称重,然后放入干燥箱中进行干燥,温度设置为 60 ℃,干燥 12 h 后称重,计算出初始含水率[14],取得平均值得到初始含水率。将每个样品称重,放入恒温干燥箱中进行干燥,每隔 10 min 进行称重,分别得到 25%、40%、55%、70%、85% 5 种不同含水率的样品,每种含水率的样品做 3 组,将做好的样品放入密封袋中,然后放入 0 ℃冰箱内 24 h,以使密封袋样品湿度均匀。

在网络分析仪校准以后,将样品放置在不锈钢圆柱形测量单元中(内径=30 mm,高度=30 mm),此不锈钢容器焊接在一个不锈钢的支架上。将支架放在恒温油浴锅中。用油浴锅对样品加热,将热电偶插在样品内部,当样品到达预定温度时,探头底面紧贴样品测量介电特性,通过计算机记录下样品的介电常数与损耗因子的数值。每个含水率的样品同一个温度下测量 3 次,然后再升温到下一个温度进行测量。每组测量的平均值作为测量结果。准备多个样品重复以上实验步骤 3 次,取 3 次测量的平均值作为测量结果。

1.5 穿透深度的计算

电磁波传送过程遇到损耗介质时,一部分波会被反射回来。没有被反射的电磁波会穿过介质表面,随着厚度的增加而衰减。电磁波对某材料的介电穿透深度(d_p)指电磁波强度减弱为物料表面强度的 1/e(e=2.718 28)时,电磁波在物料内穿过的垂直距离(m)[15]。

$$d_p=\frac{c}{2\sqrt{2}\pi f\sqrt{\varepsilon'\left(\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}-1\right)}} \quad (1)$$

式中 c 是真空下的光速,3×10^8 m/s;f 是频率,Hz。

2 结果与分析

2.1 含水率和频率对介电特性的影响

已有大量研究表明[9-11],含水率是影响介电特性的主要因素之一。图 1 为芋头片 40 ℃时,频率和不同含水率对介电特性的影响。从图 1(a)与(b)中可以看出,随着频率的增大,芋头的介电常数与介质损耗因子呈单调递减趋势。但是介电常数在低频段下降非常快,而在高频段下降比较平缓。由介质极

化理论可知,低频电场下会发生表面极化现象[16],随着频率的增大,偶极子的速度变化比电场慢,因此偶极子的取向极化就渐渐停止。同一频率下,介电常数随着其含水率的增大而增大。含水率比较低时,芋头内的水分为束缚水,离子处于不活跃状态,对芋头相对介电常数影响不大。随着含水率的增加,自由水含量增大,芋头内部离子比较活跃,因此介电常数随着其含水率的增大而增大。这和果蔬含水率与其介电常数的关系相似[17-19]。

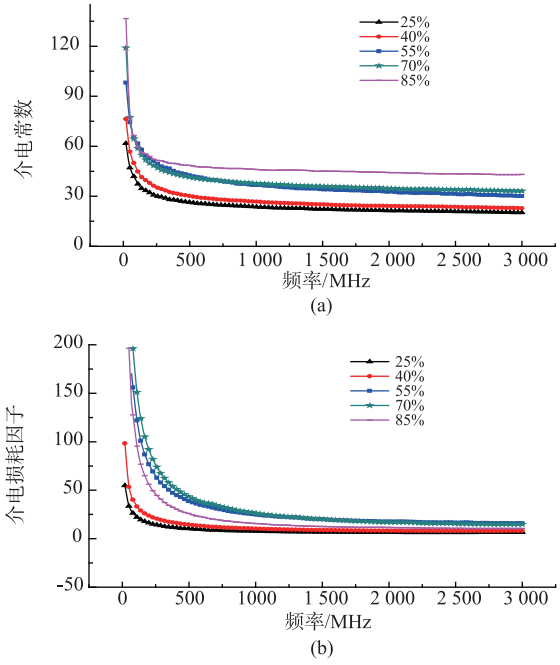
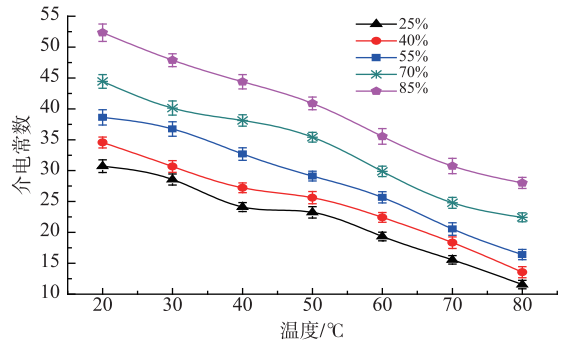


图 1　频率对不同含水率下芋头片的介电常数与介质损耗因子的影响

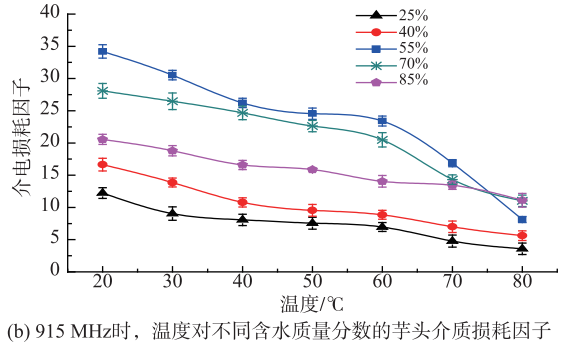
Fig. 1　Effect of frequency on dielectric constant and dielectric loss factor of taro under different moisture content

2.2　温度对介电特性的影响

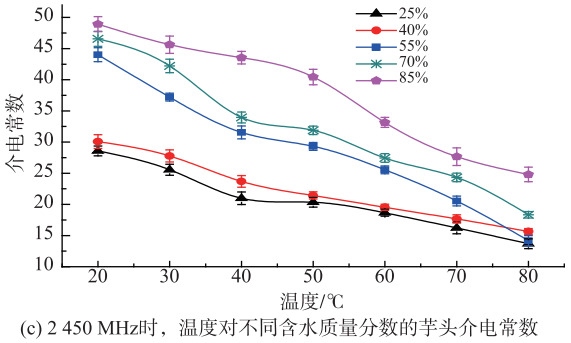
食品加工中最常用的微波频率有 2 个,工业微波频率为 915 MHz,家用微波频率为 2 450 MHz。因此在研究介电特性随温度的变化时,选取这 2 个频率下的芋头介电特性进行了分析。频率为 915 MHz 与 2 450 MHz 时,温度对不同含水率的芋头介电特性的影响曲线如图 2 所示。芋头片的介电常数与介质损耗因子都随着温度的升高而减小。在 Zheng 等[20]的研究中虾的介电特性也出现下降趋势。以含水率 85%的芋头片为例,当频率为 915 MHz 温度从 20 ℃升高到 80 ℃时,介电常数从 52.3 降到 28.4,降幅为 45.7%,介质损耗因子从 16.8 降到 11.1 降幅为 33.9%。频率为 2 450 MHz 时,温度从 20 ℃升高到 80 ℃时,芋头的介电常数从 48.9 降到 24.8,降幅为 49.28%,介质损耗因子从 12 降到 8.35 降幅为 30.41%。对比 915 MHz 与 2 450 MHz 下的介电损耗因子随温度的变化可以看出,915 MHz 下的介电损耗因子变化幅度高于 2 450 MHz。在微波频率下,偶极子损失随温度的升高而降低,在较低频率下,介电损失主要是离子损失,因此在低频率下随温度升高,介电损失显著增大。在用微波加热芋头时,高频段相比低频段受热均匀。关于温度对介电参数影响在各文献中不同,杨槐蜂蜜溶液介电常数随温度的升高而升高[21]。总体而言,样品的介电参数的变化规律,都是受温度、频率和含水率综合影响的结果。



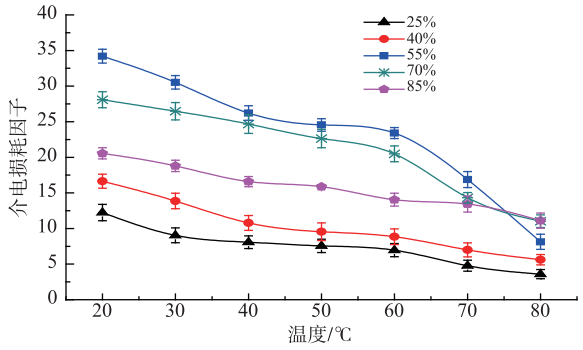
(a) 915 MHz时,温度对不同含水质量分数的芋头介电常数



(b) 915 MHz时,温度对不同含水质量分数的芋头介质损耗因子



(c) 2 450 MHz时,温度对不同含水质量分数的芋头介电常数



(d) 2 450 MHz时，温度对不同含水质量分数的芋头介质损耗因子

图 2　频率 915 MHz 时，温度对不同含水率的芋头介电常数与介质损耗因子的影响；频率 2 450 MHz 时，温度对不同含水率的芋头介电常数与介电损耗因子的影响

Fig. 2　Effect of temperature on dielectric constant and dielectric loss factor of taro with various water contents at 915 MHz, Effect of temperature on dielectric constant and dielectric loss factor of taro with various water contents at 2 450 MHz

2.3　数学模型的建立

利用 SAS 软件对频率为 915 MHz 时，5 个含水率的芋头薄片的介电常数(ε')与介电损(ε'')随温度变化的试验数据进行二元回归拟合，并建立数学模型，模型表达了含水率、温度与介电常数与介质损耗因子的关系。

$$\varepsilon'_{915}=39.725\ 6-0.193\ 2W-0.521\ 9T+6.2\times10^{-3}W^2+4.1\times10^{-3}WT+4.6\times10^{-3}T^2-1.4\times10^{-5}W^3-3.5\times10^{-5}W^2T-2.7\times10^{-5}WT^2-3.3\times10^{-5}T^3 \quad (2)$$

$$\varepsilon''_{915}=11.357\ 7-0.255\ 1W-0.362\ 9T+3.3\times10^{-2}W^2-2.12\times10^{-2}WT+1.55\times10^{-2}T^2-3\times10^{-4}W^3+2\times10^{-4}W^2T-3.7\times10^{-5}WT^2-9.7\times10^{-5}T^3 \quad (3)$$

式（2)(3）中，ε'为介电常数；ε''为介质损耗因子；W 为含水率，%；T 为温度，℃。

由表 1 显示介电特性的数学模型的显著水平均小于 0.000 1，表明模型是极显著。介电常数模型中除 W 与 W^3 外，其余各项均对模型具有显著的影响。介质损耗因子模型中除 W、T 与 WT^2 外，其余各项均对模型具有显著的影响。因此也证实，芋头片的温度显著影响其相对介电常数，且并非单纯的线性关系。当已知芋头的介电常数值和温度时，通过式(2)则可估算出芋头的含水率，这为基于相对介电常数的芋头含水率检测仪的开发提供数据支持。

2.4　穿透深度

在食品微波加热过程中，电磁波随着穿透深度的增加而降低，因此，在微波处理物质的厚度方向上，吸收的热能是不均匀的，这是由于电磁波的穿透能力不同所致。图 3(a)为温度 20 ℃，不同含水率的芋头片对穿透深度的影响。结果表明，同一含水率下，穿透深度随频率的增加而减小，在低频段降幅比较大，而在高频段降幅比较小。含水率在 25%~55%时，同一频率下穿透深度随含水率的增加减小，含水率≥55%时，同一频率下穿透深度随含水率增加而增加。(b)为含水率为 85%时温度对穿透深度的影响。结果表明，同一温度下，穿透深度随频率的

表 1　式(2)、(3)回归模型方差分析

Table 1　Regression model analysis of variance of formula(2), (3)

方差来源	自由度	平方和		$\rho_1>f$	
		ε'	ε''	ε'	ε''
W	1	0.463 0	0.807 2	0.427 5	0.762 4
T	1	4.184 1	2.023 6	0.022 9	0.632 6
W^2	1	1.550 6	43.142 2	0.152 4	0.034 6
WT	1	1.478 2	38.847 6	0.161 9	0.044 1
T^2	1	0.937 1	10.566 2	0.262 1	0.279 3
W^3	1	0.235 5	122.359 4	0.570 3	0.000 9
W^2T	1	2.371 3	92.979 3	0.079 9	0.003 0
WT^2	1	1.368 1	2.540 1	0.177 8	0.592 5
T^3	1	1.188 8	10.147 2	0.208 0	0.288 8
模型	9	3 373.522 8	1 975.758 5	<0.000 1	<0.001

增加而减小,低频段降幅比较大,而高频段降幅比较小。大多数样品同芋头一样穿透深度随频率增加而降低[22-25]。

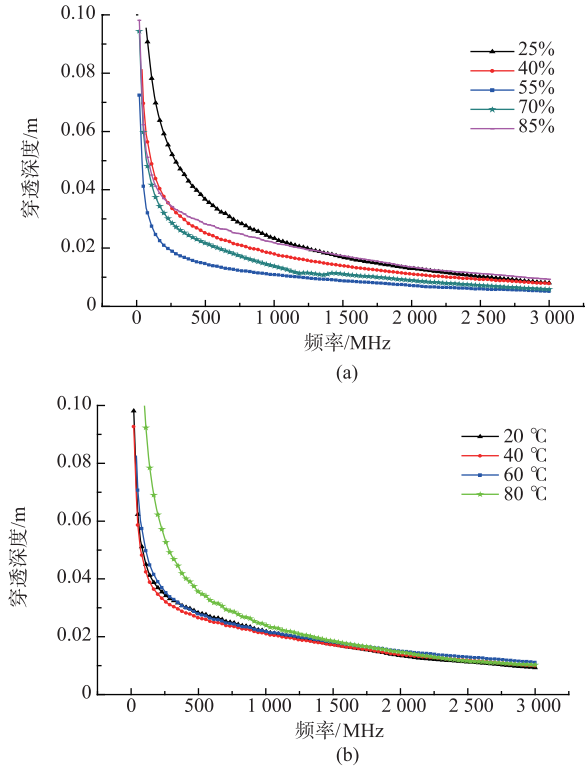


图 3　频率范围 30~3 000 MHz 含水率与温度对芋头片穿透深度的影响

Fig. 3　Influence of moisture content and temperature on the calculated penetration depth of taro at the frequency range from 30 to 3 000 MHz

图 4 为频率为 915 MHz 与 2 450 MHz 时,温度对不同含水率的芋头片穿透深度的影响。芋头片穿透深度受频率、温度和含水率的变化而发生变化。频率为 915 MHz 时,不同含水率的芋头片的穿透深度随温度的升高而升高。温度为 20 ℃, 含水率为 55%时,穿透深度最小值为 10.2 mm。频率为 2 450 MHz 时,不同含水率的芋头片的穿透深度随温度的升高而升高。温度从 20 ℃升到 80 ℃时,含水率为 85%的芋头片穿透深度从 9.4 mm 上升到 18.1 mm。温度为 80 ℃含水率为 25%时穿透深度最大为23.4 mm。温度为 20 ℃含水率为 55%时穿透深度最小为 6 mm。

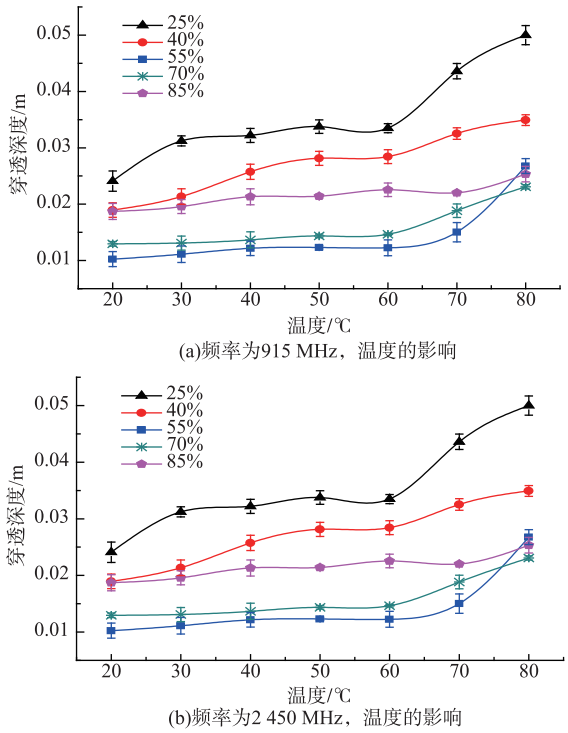


图 4　频率为 915 MHz 2 450 MHz 时,温度对不同含水率的芋头片穿透深度的影响

Fig. 4　Influence of temperature on the calculated penetration depth of with different moisture content at the frequency 915 MHz and 2 450 MHz

穿透深度数据使得开发芋头含水率检测仪成为可能。用微波、射频对物料加热和杀菌时,物料的厚度不能超过穿透深度值的 2~3 倍。因此,需要考虑芋头片穿透深度因素。

3 结　语

介电常数与介质损耗因子随频率的增加而降低,介电常数随着含水率的随着其含水率的增大而增大;芋头片的介电常数与介质损耗因子都随着温度的升高而减小;915 MHz 下介电常数与介质损耗因子的数学模型的显著水平均小于 0.000 1,可预测芋头的含水率;同一含水率与温度的芋头片穿透深度随频率的增加而降低,一定频率下的芋头片的穿透深度随温度的增加而增加。

参考文献:

[1] ZHANG Pusheng, PANG Jie, WANG Yingyuan. Color protection research peeled taro[J]. **Shanghai Vegetables**, 2002(3): 36-37. (in Chinese)

[2] CHEN Yunzhong. Taro series of food processing technology[J]. **Food Industry**, 1994(5):63-66.(in Chinese)
[3] ZHAO Hongwei. Development of taro taro paste and beverages[J]. **Food Research and Development**, 1996,3:24-27.(in Chinese)
[4] SHEN Di,LI Ying,JIANG Xiaoman,et al. Current situation taro production and processing and the main problems[J]. **Yangtze Vegetables**,2011,16:11-13.(in Chinese)
[5] SHI Baocheng,LIAN Zhengguo,LIANG Jie,et a1. Experimental study of dehydrating characteristic under microwave [J]. **Agricultural Mechanization Research**,2009,6:121-125.(in Chinese)
[6] GUO Wenchuan,ZHU Xinhua. Application of microwave drying technology in food industry[J]. **Food Science and Technology**, 1997,2:11-12.(in Chinese)
[7] VENKATESH M S,RAGHAVAN G S. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials[J]. **Biosystems Engineering**,2004,88(1):1-18.
[8] 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.
[9] NELSON S O,STETSON L E. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of hard red winter wheat [J]. **Journal of Agricultural Engineering Research**,1976,21:l8l-192.1
[10] STUART O,NELSON. Moisture,frequency and density dependence of the dielectric constant of shelled,yellow—dent field corn [J]. **Transactions of the ASAE**,1984,27(5):1573-1578.
[11] NELSON S O,LAWRENCE K C,KANDALA C V K,et a1. Comparison of DC conductance,RF impedance,microwave,and NMR methods for singIe-kernel moisture measurement in corn[J]. **Transctions of the ASAE**,1990,33(3):893-898.
[12] GUO Wenchuan. Fruit and vegetable dielectric property research review[J]. **Journal of Agricultural Engineering**,2007,23(5): 284-289.(in Chinese)
[13] GUO Wenchuan,STUART O Nelson,et al. RF dielectric properties of honeydew melon and watermelon juice and correlations with sugar content[J]. **Journal of Agricultural Engineering**,2008,24(5):289-292.(in Chinese)
[14] CASTRO G M,FITO P J,CHENOLL C,et al. Development of a dielectric spectroscopy technique for the determination of apple (Granny Smith) maturity[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2010,11(4):749-754.
[15] 王云阳. 澳洲坚果射频干燥技术研究[D]. 陕西:西北农林科技大学,2012.
[16] WANG S,MONZON M,JOHSON J A,et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts:Heating uniformity and energy efficiency[J]. **Postharvest Biology and Technology**,2007,45(2):240-246.
[17] ZHANG Libin,XU Fang,ZOU Guojun. The study on the he relationship of between Apple's dielectric property and freshness[J]. **Journal of Agricultural Engineering**,1996,1:190-194.(in Chinese)
[18] 郭红利. 猕猴桃的电学特性与无损检测技术的研究[D]. 陕西:西北农林科技大学,2004.
[19] GUO W C,ZHU X H,Guo K Q,et al. Electrical properties and the freshness of peach recognition [J]. **Journal of Agricultural Machinery**,2007,38(1) :112-115.(in Chinese)
[20] ZHENG M,HUANG Y W,NELSON S O,et al. Dielectric properties and thermal conductivity of marinated shrimp and channel catfish[J]. **Journal of Food Science**,1998,63(4):668-672.
[21] 刘熠. 蜂蜜介电特性的研究[D]. 陕西:西北农林科技大学,2011.
[22] 郭文川,吴晓玲,朱新华,等. 10～4 500 MHz 下板栗及栗实像甲的介电特性[A]. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集[C]. 重庆:中国农业工程学会(CSAE),2011,6.
[26] AHMED J,RAMASWAMY H S,RAGHAVAN G S V. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration,temperature and pH[J]. **LWT–Food science and Technology**,2008,41(1):71-81.
[23] AHMED J,RAMASWAMY H S,RAGHAVAN G S V. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration,temperature and pH[J]. **LWT–Food science and Technology**,2008,41(1):71-81.
[24] RENARD D,LEFEBVRE J. Gelation of globular proteins:effect of pH and ionic strength on the critical concentration for gel formation.A simple model and its application to β-lactoglobulin heat-induced gelation[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,1992,14(5):287-291.
[25] GUO W,ZHU X,LIU Y,et al. Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing[J]. **Journal of Food Engineering**, 2010,97(2):275-281.