

# 食品介电性质的研究进展

范大明<sup>1</sup>, 陈卫<sup>1\*</sup>, 李春香<sup>1</sup>, 毛丙永<sup>1</sup>, 庞珂<sup>2</sup>, 赵建新<sup>1</sup>, 张灏<sup>1</sup>

(1. 江南大学食品学院食品科学与技术国家重点实验室, 江苏无锡 214122;

2. 无锡华顺民生食品有限公司, 江苏无锡 214218)

**摘要:** 食品的介电性质是与微波和射频处理相关的最重要的物理参数。本文综述了介电性质在食品领域中的研究概况、预测模型和测定方法, 并对存在的问题进行分析。

**关键词:** 介电特性, 预测模型, 测定方法, 研究进展

## Research progress in dielectric properties of food

FAN Da-ming<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1\*</sup>, LI Chun-xiang<sup>1</sup>, MAO Bing-yong<sup>1</sup>, PANG Ke<sup>2</sup>, ZHAO Jian-xin<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology,

Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Wuxi Huashun Minsheng Food Co. Ltd., Wuxi 214218, China)

**Abstract:** Dielectric property is the essential physical parameter to microwave processing and radio frequency process. This paper summarized the current research, prediction model and measurement method analyzed the current issues in this field.

**Key words:** dielectric property; prediction model; measurement method; research advance

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2012)11-0407-04

食品介电性质是微波和射频广泛应用于食品加热、干燥、脱水以及解冻等加工过程的重要参数, 食品的介电性质反映了食品与电磁场相互作用的程度, 决定了微波和射频在食品中的穿透深度, 直接影响食品的加热特性。理论上考察两个参数, 介电常数 $\epsilon'$ 和介电损失因数 $\epsilon''$ 。介电常数反映物料在电磁场中贮存能量的能力, 介电损失因数则影响电磁能向热能的转化。 $\tan\delta=\epsilon''/\epsilon'$ 是所消耗的能量与蓄积能量之比, 被称为耗散因数或损耗正切,  $\delta$ 为损耗角。物质的介电参数不是恒值, 它们受频率、温度、极化特性、压力和组成等因素的影响。了解介电性质有助于模拟食品在电磁场中的行为, 对于利用介电特性更好地应用于食品加工具有非常重要的意义。本文对食品介电特性研究现状、预测模型和测量技术进行阐述, 并指出目前食品介电性质研究存在的问题和今后方向。

### 1 食品介电性质的研究概况

关于食品介电性质的研究大多数集中在温度、频率、水分含量以及食品的组分, 特别是盐和脂肪含量对食品介电性质的影响。Herve<sup>[1]</sup>等人对不同脂肪含量的松软干酪介电特性进行研究, 分析了盐、脂肪、温度和频率对于干酪介电特性的影响。Tanaka<sup>[2]</sup>和Regier<sup>[3]</sup>等人分别对虾泥和冷冻土豆泥在微波解冻和

加热过程的介电特性进行了分析, 发现在熔点附近介电常数和介电损耗有一个很大的变化。Lyng<sup>[4]</sup>和Sakiyan<sup>[5]</sup>等人对牛排配料和蛋糕配方改变对汉堡包和蛋糕介电性质的影响进行了研究。Guo<sup>[6]</sup>等人研究了鸡蛋的介电性质在10到1800MHz的频率范围内随储藏时间的变化, 同时测定了水分含量、灰分含量以及蛋黄指数等指标, 发现介电性质与这些指标之间无明显的相关性。Tang<sup>[7]</sup>等人比较大马哈鱼和鲟鱼子酱在射频频率(27MHz)和微波杀菌频率(915MHz)下的介电性, 相对微波频率, 射频频率下的介电特性随温度和盐含量显著提高。Zhang<sup>[8]</sup>等人在微波和射频加热猪肉时发现, 脂肪、水分和盐含量对猪肉介电特性均有影响。Ragni<sup>[9]</sup>等人对鸡蛋在储存过程中的介电性质研究发现, 蛋黄的介电特性与鸡蛋的年龄之间有一定的关系, 随储存时间的延长介电特性增大。证明在频率400MHz和20MHz下, 介电常数和介电损耗与储存时间有很大的相关性, 这为测定鸡蛋的新鲜度提供了检测方法。Ahmed<sup>[10]</sup>等人对印度香米粉浆的介电性质做了研究, 发现黄油的添加使米浆的介电特性下降。对黄油的介电特性与频率、盐含量和温度的关系的研究发现介电特性与盐含量之间存在线性相关, 可作为盐含量检测的方法<sup>[11]</sup>。Guo<sup>[12]</sup>等人结合水分、频率和温度等因素预测了鹰嘴豆粉的介电性。又有学者研究了水分、频率和温度对四种豆类面粉(鹰嘴豆、绿豆、扁豆和黄豆)介电特性的影响, 并发现在一定的频率范围, 介电特性和物料密度有高度的相关性, 从而提出介电特性可预测物料密度的论断, 并确立了介电特性频率和穿透深度的关系, 为

收稿日期: 2011-06-14 \* 通讯联系人

作者简介: 范大明(1983-), 男, 在读博士研究生, 研究方向: 食品生物技术。

基金项目: 国家科技支撑计划(2008BAD91B03); 国家科技部农业科技成果转化资金项目(2008GB2B200083)。

实现均匀快速加热提供理论指导<sup>[13]</sup>。Nelson<sup>[14]</sup>等人研究发现水分含量对食品的介电性质影响显著,对于高水分含量食品,自由水的影响是主要的,而低水分含量食品结合水则是主要的影响因素。Dev<sup>[15]</sup>等人对蛋清、蛋黄和全蛋的介电性质进行研究,发现蛋清和蛋黄的介电常数都随温度和频率的升高而下降,介电损耗随频率升高而升高,随温度升高下降。Wang<sup>[16]</sup>等人对蛋清和全蛋在微波和射频加热下的介电性质进行研究,发现介电性质可作为蛋白质变性程度的指标。Basaran-Akgul<sup>[17]</sup>等人研究微波和射频频率下的牛肉腱的介电特性发现肌肉纤维方向、预处理和温度都影响介电特性。Tang等人对大马哈鱼排不同部位在射频和微波频率下的介电性质进行研究,发现鱼排成分的差异对介电性质的影响很小,不同部位介电性质随温度变化的趋势相同,同时考察运用乳清蛋白凝胶作为大马哈鱼鱼排模型物质,结合其介电性质与温度、盐含量和频率的相关性研究,构建复配模式体系,证实乳清蛋白凝胶作为大马哈鱼鱼排模型物质是可行的<sup>[18-19]</sup>。此外,介电特性还可以应用于过程控制中食品组成含量的在线检测,如食品中水分含量的检测<sup>[20-21]</sup>和食用植物油的品质检测<sup>[22-24]</sup>;农作物中的灭虫、防虫以及产品中的微生物控制;评价微波作用效率<sup>[25]</sup>和食品加工过程中的其他变化等。

## 2 介电性质的预测模型

水是食品主要成分中介电性质最高的一类化合物,在高水分和半干食品中的各种形式对指定条件(频率、温度等)下物料的介电特性起到非常重要的作用,引起介电损失的机理是介电材料的离子导电和偶极子旋转:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_\sigma''$$

对于含有极性分子的纯溶液(如水、酒精等),介电常数和介电损耗的频率相关性常用德拜模型表示:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

其中, $\varepsilon_\infty$ 是频率无穷大时的相对介电常数, $\varepsilon_s$ 是静态或零频率时的相对介电常数, $\tau$ 是松弛时间(s), $\omega$ 为角频率(rad/s)且 $\omega = 2\pi f$ , $f$ 为微波频率(Hz)。

通常食品内的水分一般会混入外源离子,针对高水分含量的固体食品,Ratanadecho<sup>[26]</sup>通过对矩形波导加热液体进行数学建模,凭借数值分析和验证实验,提出带电离子水溶液的介电特性可由Stogryn方程表示:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_\sigma'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}$$

其中, $\varepsilon_\sigma'' = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}$ ,为离子传导的介电损失,对数化为: $\log \varepsilon_\sigma'' = \log \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} - \log f$ ,可看出 $\varepsilon_\sigma''$ 与 $f$ 的对数关系曲线斜率为-1。

对于水分含量较低和含离子的固体食品,德拜模

型预测结果与真实结果之间有很大差异,必须进行修正。Tang<sup>[27]</sup>等人用修正后的德拜公式分析面包中结合水、自由水,以及频率对介电损失的影响。面包的含水量为34.0%~38.6%,为中等水分含量的固体物质,离子传导导致的介电损失用修正的德拜模型预测:

$$\log \varepsilon_\sigma'' = \log \frac{\sigma_c}{2\pi f \varepsilon_0} - \log f$$

其中,设 $a = \log \frac{\sigma_c}{2\pi f \varepsilon_0}$ ,则有效电导率为 $\varepsilon_c = 2\pi f \varepsilon_0 10^a$ 。

结合水和自由水偶极子旋转导致的介电损失用修正的德拜模型预测分别表示为:

$$\varepsilon_b'' = M_b (1-e) \frac{(\varepsilon_{cb} - \varepsilon_{\infty b}) \frac{f}{f_{cb}}}{1 + \left(\frac{f}{f_{cb}}\right)^2}$$

$$\varepsilon_f'' = (M - M_b) (1-e) \frac{(\varepsilon_{cf} - \varepsilon_{\infty f}) \frac{f}{f_{cf}}}{1 + \left(\frac{f}{f_{cf}}\right)^2}$$

$$\varepsilon_d'' = \varepsilon_b'' + \varepsilon_f''$$

其中 $e = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_m}$ 为面包多孔率, $\rho_{ap}$ 为表观密度( $\text{kg/m}^3$ ),

$\rho_m$ 为实际密度( $\text{kg/m}^3$ ), $\varepsilon_b''$ 为面包中含结合水的介电损失, $\varepsilon_f''$ 为面包中自由水的介电损失, $M_b(1-e)$ 表示单位体积面包中结合水的含量, $(M - M_b)(1-e)$ 表示单位体积面包中自由水的含量。

## 3 介电性质的测定方法

目前对于介电性的测量技术主要有同轴探头技术、时域反射计、谐振腔技术和自由空间技术等。其中,开放式同轴探头技术、时域反射计和谐振腔技术是最常用的食品介电特性测试技术。开放式同轴探测器的特点是简单、方便、无损,并且精确度较高,适用于宽频率范围(500M~110GHz)液体或半固体状材料介电特性的测量,但是要求材料是非磁性、各向同性且同质、厚度大于1cm,同时样品截面较大。对于介电常数和损耗因子小的材料,该方法的精度有限;开放式同轴探测器由一个网络分析仪、带同轴电缆的探测器、温度控制装置、热电偶和测试室组成。在测定前,首先预热网络分析仪至少30min,校准元件包括四个校准测试:开放式末端、金属性短路、50 $\Omega$ 负载和低损耗电容器,其后用金属性短路、开放式末端(空气)和已知介电特性的负载(25 $^\circ\text{C}$ 的水)校准测试探头<sup>[28]</sup>。时域反射计(TDR)用于食品中介电性质的测定具有快速、简单和非破坏性,作为一种传输线技术,将样品放在密闭的传输线承样位置(通常该传输线是矩形的波导或者同轴线),由于线路中的负载会引起线路中阻抗特性和传输特性的变化,因此常用矢量网络分析仪测量负载线路中的反射系数(S11)和传输系数(S21),利用计算机和软件计算被测样品的介电常数等,该技术的特点是其精度比同轴探头法高,但要求样品的断面形状与传输线的断面形状完全相同,材料断面平坦、光滑且与长轴对称,因此制备样品比较繁琐。此外,该技术适用的频率范围较窄。Miura等人采用时域反射计测定固体和液体食品的微波介电特性,固体食品如胡萝卜、小萝卜、土豆、大米、牛奶、奶酪、蛋清、蛋黄、鱼、鸡肉和各种水凝胶等,液体食品如白酒、啤酒和果酒等<sup>[29]</sup>;还有一种方法是谐振

腔技术,谐振腔是在一定频率下发生谐振的具有高品质因子的腔体。测量时将样品放于腔体中,通过网络分析仪迅速测量到中心频率 $f$ 和品质因子 $Q$ ,根据 $f$ 和 $Q$ 计算一定频率下的介电常数,而根据腔体中品质因子的变化可以计算材料的损耗因子,该技术要求网络分析仪必须具有非常好的频率分辨率(1Hz)以测量 $Q$ 的微小变化,其特点是测量前不需要校准网络分析仪,测量非常准确,对于耗散因数低的产品非常敏感,材料准备比较容易,测量比较省时,适合于高温或低温环境下的测量。但要求样品是低损耗、小体积。该技术仅能在一个或几个频率下测量,分析比较复杂,而且必须知道样品截面的精确尺寸<sup>[28,30]</sup>。

#### 4 存在问题和展望

目前,食品介电特性的研究已经取得了较大的进展,这些研究为了解物料的介电特性提供了依据,为利用微波能加热复杂食品物料奠定了基础,然而由于食品组分介电性的差异以及加工过程的复杂性,缺乏大量的基础研究积累,例如:涉及食品冷冻和杀菌温度范围(高达130℃)的介电谱基础数据,在微波烹饪和再热过程中能够反映生化变化的数据,以及在微波烘干过程中温湿度大范围变化的数据。其次,目前介电特性的应用还很狭窄,主要集中在食品成分的无损检测和食品加热特性的预测上,开展利用介电特性对食品微波和射频加工过程的在线监控技术,为食品加工过程的自动化和精确化提供依据,建立食品质量与介电特性之间的关系,利用物料的介电特性进行农产品安全预警技术的研究,以及为快速发展的农产品物流管理提供更多更好的检测手段,将成为未来食品介电性质研究的发展方向<sup>[31]</sup>。

#### 参考文献

[1] Herve A-G, Tang Juming, Luedeckeb L, et al. Dielectric properties of cottage cheese and surface treatment using microwaves[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 37: 389-410.

[2] Tanaka F. Dielectric properties of shrimp related to microwave frequencies: from frozen to cooked stages[J]. Journal of Food Process Engineering, 1999, 22: 455-468.

[3] Regier M, Housova J, Hoke K. Dielectric properties of marshed potatoes[J]. International Journal of Food properties, 2001, 4(3): 431-439.

[4] Lyng J G, Scully M, McKenna B M. The influence of compositional changes in beefburgers on their temperatures and their thermal and dielectric properties during microwave heating [J]. Journal of Muscle Foods, 2002, 13: 123-142.

[5] Sakiyan O, Sumnu G, Sahin S, et al. Investigation of dielectric properties of different cake formulations during microwave and Infrared-Microwave combination baking[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(4): E205-E213.

[6] Guo Wenchuan, Trabelsi S, Nelson S O, et al. Storage effects on dielectric properties of eggs from 10 to 1800MHz[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(5): E335-E340.

[7] Al-Holy M, Wang Yifen, Tang Juming, et al. Dielectric properties of salmon(*Oncorhynchus keta*) and sturgeon(*Acipenser*

*transmontanus*) caviar at radio frequency (RF) and microwave (MW) pasteurization frequencies[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 70: 564-570.

[8] Zhang Lu, Lyng J G, Brunton N P. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 142-151.

[9] Ragni L, Al-Shami A, Mikhaylenko G, et al. Dielectric characterization of hen eggs during storage[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82: 450-459.

[10] Ahmed J, Ramaswamy H S, Raghavan V G S. Dielectric properties of Indian Basmati rice flour slurry[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 1125-1133.

[11] Ahmed J, Ramaswamy H S, Raghavan V G S. Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82: 351-358.

[12] Guo Wenchuan, Tiwari G, Tang Juming, et al. Frequency, moisture and temperature - dependent dielectric properties of chickpea flour[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101: 217-224.

[13] Guo Wenchuan, Wang Shaojin, Tiwari J, et al. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43: 193-201.

[14] Nelson S O, Trabelsi S. Influence of water content on RF and microwave dielectric behavior of foods[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2009, 43(2): 13-23.

[15] Dev S R S, Raghavan G S V, Garipey Y. Dielectric properties of egg components and microwave heating for in-shell pasteurization of eggs[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86: 207-214.

[16] Wang J, Tang Juming, Wang Yifen, et al. Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42: 1204-1212.

[17] Basaran-Akgul N, Basaran P, Rasco B A. Effect of temperature (-5 to 130℃) and fiber direction on the dielectric properties of beef semitendinosus at radio frequency and microwave frequencies [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(6): E243-E249.

[18] Wang Yu, Tang Juming, Rasco B, et al. Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87: 236-246.

[19] Wang Yu, Tang Juming, Rasco B, et al. Using whey protein gel as a model food to study dielectric heating properties of salmon (*Oncorhynchus gorbusha*) fillets[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42: 1174-1178.

[20] 郝晓莉, 张本华, 孟淑洁, 等. 介电特性在粮食含水率检测中的应用研究[J]. 农机化研究, 2006(2): 121-123.

[21] 秦文, 陈宗道, 羽仓义雄, 等. 食品的介电特性在食品干燥过程中的在线无损检测技术[J]. 食品与发酵工业, 2005(8): 52-56.

[22] 张俐, 马晓愚, 雷得无, 等. 基于食用植物油介电特性的实验研究[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(10): 108-111.

[23] 郭文川, 吕俊峰, 谷洪超. 微波频率和温度对食用植物油

(下转第413页)

- [J]. 吉林医药学院学报, 2010, 31(2): 99-101.
- [38] 王丽君, 苏小明, 孙戈新. 龙芽槐木皂苷抗衰老作用的实验研究[J]. 中国老年学杂志, 2007, 27(11): 1043-1044.
- [39] 裘名宜, 冯龙飞. 黄毛槐木皂苷的抗衰老作用研究[J]. 时珍国医国药·药理药化, 2006, 17(12): 2480-2481.
- [40] 曹亚军, 陈虹, 杨光, 等. 薯蓣皂苷对亚急性衰老小鼠的抗氧化作用研究[J]. 中药药理与临床, 2008, 24(3): 19-20.
- [41] 顾晓芬, 顾永健, 姜正林. 刺五加皂甙对自由基作用和无血清培养条件下两种神经元衰老模型细胞的保护作用[J]. 中国临床康复, 2005, 25(9): 123-125.
- [42] 靳莉, 高学敏, 汪锦邦, 等. 大豆总皂甙抗衰老作用的研究(II. 抗衰老功能的实验研究)[J]. 食品工业科技, 1999(增刊): 32-33.
- [43] 刘杰书. 麦冬注射液抗衰老作用机制研究[J]. 中国药房, 2006, 17(23): 1774-1775.
- [44] 姜涛, 黄宝康, 张巧艳, 等. 阔叶山麦冬总皂苷对D-半乳糖衰老模型小鼠学习记忆及代谢产物的影响[J]. 中西医结合学报·实验论著, 2007, 5(6): 670-674.
- [45] 张舜波, 游秋云, 吴丽丽. 酸枣仁总皂苷对老年阴血亏虚型失眠证候模型大鼠脑组织Glu及GABA含量的影响[J]. 湖北中医学院学报, 2009, 11(2): 19-21.
- [46] 宋奇. 中药黄芪在驻颜抗衰老方面的研究进展[J]. 中国新技术新产品, 2011(8): 10-12.
- [47] 王曦, 石钰, Viennet C, 等. 黄芪甲苷对人皮肤成纤维细胞增殖和凋亡的影响[J]. 中华医学美容杂志, 2006, 12(2): 93-97.
- [48] 武晓群, 秦晶. 中医药延缓衰老机制的研究进展[J]. 中医研究, 2007, 20(11): 59-61.

(上接第406页)

- [36] 林维宣, 孙学谦, 佟绍芳. 紫外分光光度法测定山楂中总黄酮的研究[J]. 大连轻工业学院学报, 1993, 12(2): 42-50.
- [37] 陈丛瑾, 黄克瀛. 色谱方法在植物黄酮含量测定中的应用[J]. 光谱实验室, 2007, 24(5): 820-824.
- [38] Robards K, Prenaler PD, Tucker G, et al. Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits[J]. Food Chem, 1999, 66: 401-436.
- [39] 马养民, 毋宇佳, 于孟洁. 离子抑制反相高效液相色谱法测定槐米中芦丁含量的研究[J]. 分析化学, 1993, 21(3): 368-370.
- [40] 徐远, 张月华. 高效液相色谱法分离测定甾柑中的黄酮苦味成分[J]. 食品发酵与工业, 1991(2): 72-77.
- [41] 张廷之, 侯镜德, 徐秀珠. 反相高效液相色谱法测定毛竹叶中总黄酮[J]. 理化检验: 化学分册, 2001, 37(3): 117-118.
- [42] 李凤林, 李青旺, 高大威. 天然黄酮类化合物含量测定方法研究进展[J]. 江苏调味副食品, 2008, 25(4): 8-13.
- [43] 魏胜华, 孟娜, 伍和芳. 毛细管电泳法测定柚皮中柚皮苷的含量[J]. 光谱实验室, 2011, 28(2): 853-856.
- [44] 刘志敏, 赵锁奇, 王仁安. 黄酮类化合物的超临界流体色谱分离[J]. 分析化学, 1997, 25(3): 272-275.
- [45] 周芳, 郑国栋, 蒋林. 薄层扫描法同时测定广陈皮中三种黄酮类化合物的含量[J]. 中药材, 2009(6): 911-913.

(上接第409页)

- 介电特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 124-129.
- [24] 张春娥, 薛文通, 张泽俊, 等. 食用植物油介电特性的研究进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32(1): 349-352.
- [25] Fether L E. Energy efficient microwave systems: materials processing technologies for avionic, mobility and environmental applications[M]. Springer, 2009.
- [26] Ratanadecho P, Aoki K, Akahori M. A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effects of natural convection and dielectric properties) [J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26: 449-472.
- [27] Liu Yanhong, Tang Juming, Mao Zhihui. Analysis of bread loss factor using modified Debye equations[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93: 453-459.
- [28] 郭文川, 朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 308-312.
- [29] Miura N, Yagihara S, Mashimo S. Microwave dielectric properties of solid and liquid foods investigated by Time-domain Reflectometry[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(4): 1396-1403.
- [30] Guan Yong, Nikawa Y. Measurement of temperature-dependent complex permittivity for materials using cylindrical resonator under microwave irradiation[J]. Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi, 2006, 89(12): 1032-1038.
- [31] 马荣朝, 秦文, 吴维雄, 等. 食品电物性在无损检测中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 278-282.

欢迎订阅《食品工业科技》，邮发代号2-399