

文章编号:1000-0615(2005)02-0252-06

温度和频率对鱼糜介电特性的影响

何天宝, 程裕东

(上海水产大学食品学院, 上海 200090)

摘要:采用同轴探针方法分别测定了30~80℃, 频率320~2 960 MHz内罗非鱼鱼糜和阿拉斯加狭鳕鱼糜的介电常数和介电损失率。频率一定时, 两种鱼糜的介电常数随温度升高而降低; 在相同的温度下, 频率增加, 鱼糜的介电常数反而减小。频率升高使两种鱼糜的介电损失率先减少后增加, 分别在890 MHz(罗非鱼鱼糜)和1 350 MHz(狭鳕鱼糜)出现拐点。温度与介电损失率的相关性与频率有关, 拐点频率之前, 温度与介电损失率成正相关性, 而大于拐点频率时, 则成负相关性。本研究提出了两种鱼糜的介电常数和介电损失率关于温度和频率的预测方程, 预测值与实验值具有良好的一致性。两种鱼糜的穿透深度在915 MHz随温度升高而减小, 在2 450 MHz时则正好相反。鱼种的差异对鱼糜介电特性和穿透深度有较大影响。SPSS软件可以对鱼糜的介电特性进行有效预测。

关键词:鱼糜; 介电特性; 温度; 频率; 预测方程; 穿透深度

中图分类号: S986.1; TS254.1

文献标识码: A

Effect of temperature and frequency on dielectric properties of surimi

HE Tian-bao, CHENG Yu-dong

(College of Food Science, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: The dielectric constant and loss factor of tilapia surimi and Alaska pollack surimi were measured by the open-ended coaxial probe method in the frequency range from 320 MHz to 2 960 MHz and temperature from 30℃ to 80℃. Dielectric constant of the two kinds of surimi decreased with both temperature and frequency. The dielectric loss factor changed quadratically with increasing frequency: first decreasing and then increasing. The loss factor of tilapia surimi and Alaska pollack surimi dropped to their minimums at 890 MHz and 1 350 MHz respectively. Temperature had a positive correlation with the loss factor before the inflexion and the temperature dependence reversed after the inflexion frequency. Six predictive equations related to the dielectric properties of the two kinds of surimi were developed as a function of temperature and frequency, and then proved to be reasonable. The penetration depths decreased with increasing temperature at 915 MHz, but the temperature dependence reversed at 2 450 MHz. The differences between surimi species had a significant effect on the dielectric properties and penetration depths of surimi. It was effective to apply SPSS to the prediction of surimi dielectric properties.

Key words: surimi; dielectric properties; temperature; frequency; predictive equation; penetration depth

近年来,微波和静电加热技术在干燥、膨化、杀菌、保鲜等食品加工领域中得到日益广泛的应用,微波炉在家庭中的普遍使用促进了微波食品的迅速发展,但由于微波加热具有选择性,会引起食品内部温度分布不均匀,从而导致食品品质下降。食品的介电特性、形状尺寸以及电场强度等因素都会影响微波加热的温度分布,其中介电特

性是最关键的因素^[1]。因此食品的介电特性越来越引起人们的关注并被广泛研究。同时,随着现代食品品质评价技术的不断发展,食品的介电特性已被用于食品品质检测、货架期预测等领域^[2]。

介电特性是研究食品与电场相互作用的关键因素,通常考察两个参数,即介电常数(ϵ')和介电损失率(ϵ'')。介电常数反映物料的电容性,即在

收稿日期:2004-08-31

资助项目:上海市曙光计划基金项目(2000SG36)

作者简介:何天宝(1979-),男,四川阆中人,硕士研究生,从事食品工程学研究。E-mail: tbhe1979@163.com

通讯作者:程裕东, Tel:021-65710296, E-mail: ydcheng@shfu.edu.cn

电磁场中贮存能量的能力;介电损失率则反映物料的电阻,表征物料将电磁能转化成热能的能力^[3]。介电特性的复数形式为:

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (1)$$

影响食品介电特性的因素通常有:电磁波频率、温度、物料密度、水分含量、盐含量以及食品物料的物理状态等^[4,5]。国外的一些学者已经对食品的介电特性做了大量的研究,积累了大量的不同种类食品的介电数据。Bengtsson 和 Risman^[6]、Nelson^[7]、Sun 等^[8]曾分别就肉类、果蔬和谷物等的介电特性做过测定并提出了一些介电特性的预测方程。

微波技术应用于鱼糜类制品加工的设想在上世纪七十年代就曾提出,Cao 等^[9]也报道了微波加热应用于鱼糜类制品凝胶化过程的可行性。但由于微波加热会导致产品的温度分布不均匀从而严重影响产品的品质,所以目前微波加热也仅用于鱼糜类制品生产中的预加热过程^[3]。要解决这一问题,研究鱼糜的介电特性就十分重要,但目前有关鱼糜介电特性的文献甚少。

本研究通过研究频率和温度对两种鱼糜介电特性的影响,以期建立两种鱼糜介电常数和介电损失率关于温度和频率的预测方程,并探讨 915 MHz 和 2 450 MHz 微波加热频率下两种鱼糜的介电特性与温度的关系,为研究鱼糜的电物性及鱼糜类制品的微波工业化生产提供一定的参考。

1 材料和方法

1.1 实验材料

分别选择一种海水鱼鱼糜(阿拉斯加狭鳕鱼糜)和一种淡水鱼鱼糜(罗非鱼鱼糜)作为实验对象。其化学组成如表 1 所示。狭鳕鱼糜由美国进口,罗非鱼鱼糜由实验室自制。

表 1 两种鱼糜的化学成分

Tab.1 The composition of two kinds of surimi

鱼糜种类 surimi type	水分(%) moisture	蛋白质(%) protein	其他(%) others	等级 grade
狭鳕鱼糜 Alaska pollack surimi	74.4	16.4	9.2	SA
罗非鱼糜 tilapia surimi	76.5	14.8	8.7	-

1.2 鱼糜样品制备

将两种冷冻鱼糜置于室温下解冻 2~3 h,然

后切成小块,调整成分使两种鱼糜的蛋白质含量为 14.7%,水分含量为 78.0%,其它为 7.3%;用 Stephon NHY20 型低温真空擂溃机以 300 r·min⁻¹ 空擂 5min 后,再以 900 r·min⁻¹ 高速擂溃 20 min,最后 2 min 进行真空脱气,将鱼糜充填于聚偏二氯乙烯容器(内径 3.5 cm,高 3.5 cm)中以供测定。

1.3 介电特性的测量

样品的介电常数和介电损失率用同轴探针介电特性测定仪(HP85070B; Hewlett Packard Corp., USA)进行测量。该系统由介电探针、数据分析仪、计算机、探针电缆和一个恒温箱构成。本研究选择频率范围为 320~29 60 MHz,频率间隔 43.2 MHz;温度 30~80℃,温度间隔 10℃。样品温度用热电偶进行跟踪测量,每种样品介电常数和介电损失率均平行测量 3 次。

1.4 数据分析

取 3 次测量数据的平均值,用 SPSS 统计分析软件^[10](Version 10.0)分别就两种鱼糜的介电常数和介电损失率对温度和频率进行多元线性回归分析,利用方差分析(ANOVA)检验温度和频率对介电特性影响的显著性水平。方程的回归优度用回归系数 R_{adj}^2 来表示,显著性水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 介电常数

两种鱼糜的介电常数值有一定的差异,但都在 25~65 的范围之内。温度一定时,两种鱼糜的介电常数都随频率增加而减小(图 1 和图 2)。这是因为食品中水分对介电常数的影响最大,纯水的介电常数随频率增加而下降^[6],对于含水 70% 以上的鱼糜,其介电常数与频率成一定负相关性。

当频率一定时,鱼糜的介电常数随温度的升高而下降。在 915 MHz 时,当温度从 30℃ 升高到 80℃,罗非鱼和狭鳕两种鱼糜的介电常数分别从 61.31、55.18 下降到 43.35、32.54,下降幅度分别为 29.29% 和 24.94%;2 450 MHz 时,罗非鱼鱼糜的介电常数由 57.67(30℃)下降到 40.07(80℃),狭鳕鱼糜的介电常数则由 49.07(30℃)减少为 29.43(80℃)。鱼糜介电常数与温度的这一关系与对高水分玉米的研究结论类似^[7]。

温度对介电常数的影响主要与食品物料中自由水和束缚水的含量和比例有关,自由水的存在

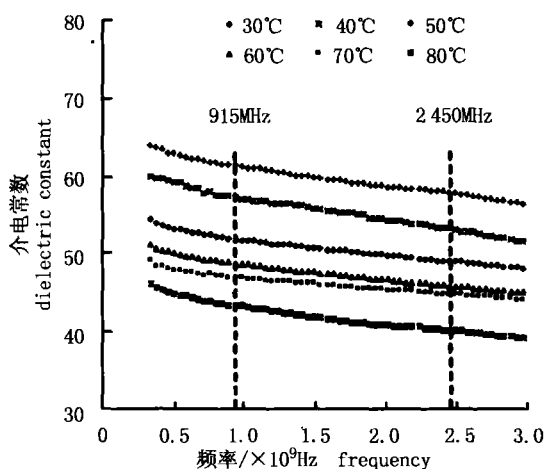


图1 温度和频率对罗非鱼糜介电常数的影响

Fig.1 Effects of temperature and frequency on dielectric constant of tilapia surimi

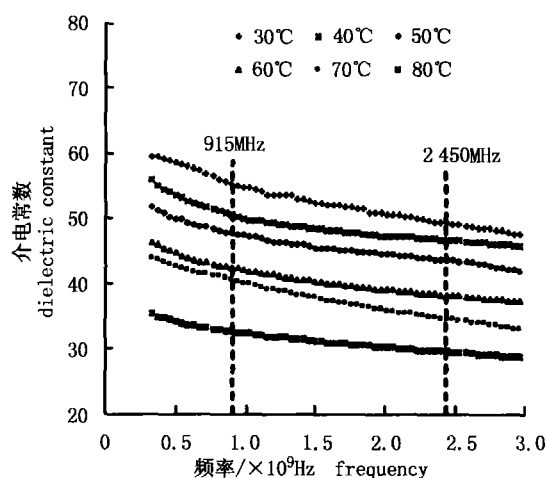


图2 温度和频率对狭鳕鱼糜介电常数的影响

Fig.2 Effects of temperature and frequency on dielectric constant of Alaska pollack surimi

使介电常数与温度成负相关,而束缚水则使介电常数与温度成正相关^[11]。因此,食品中的自由水与束缚水的比例决定了最终食品体系的介电常数与温度的变化关系。鱼糜是一种高含水量的食品,其自由水含量(大于70%)远远大于束缚水含量(小于2%),这就决定了其介电常数与温度成一定负相关性,即随温度上升而下降。

2.2 介电损失率

温度一定时,随频率增加,两种鱼糜的介电损失率均呈先减小后增大的趋势,在某一拐点频率时达到最小值(图3和图4)。Ohlsson和

Benatsson^[12]对这一现象作出解释,认为对于含水量较高的食品,由于受水分的影响,其介电损失率随频率增加而增加,但在频率较低时,食品中其他成分(灰分、蛋白质、盐分等)导致的电导损耗占主导,因此介电损失率会先减小后增加;而Mudgett^[13]认为,介电损失是偶极子损失和离子损失两部分的共同效应:频率增加,离子损失增加而偶极子损失减少,这就导致了介电损失率先减小后增大。两种鱼糜的介电损失率曲线拐点有所差异,罗非鱼糜约发生在890 MHz(图3),而狭鳕鱼糜则在1350 MHz左右(图4)。两种鱼糜成分的差异,尤其是水分、蛋白质等的差异可能是导致介电损失率数值和拐点频率不同的原因。

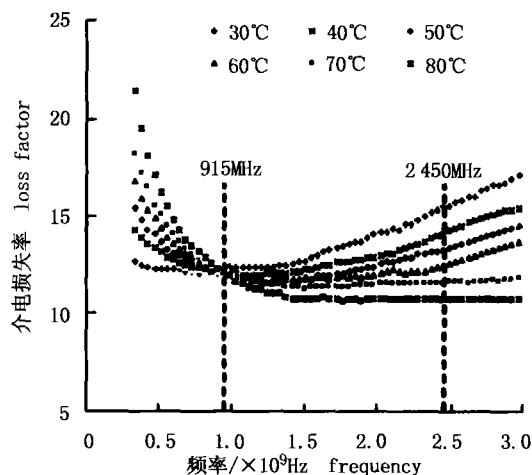


图3 温度和频率对罗非鱼糜介电损失率的影响

Fig.3 Effects of temperature and frequency on loss factor of tilapia surimi

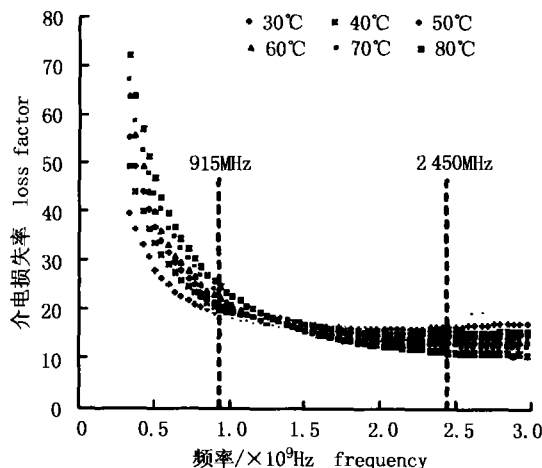


图4 温度和频率对狭鳕鱼糜介电常数的影响

Fig.4 Effects of temperature and frequency on loss factor of Alaska pollack surimi

温度对介电损失率的影响与频率、水分含量以及离子电导率有关^[11]。本研究中,当频率分别小于 890 MHz 和 1 350 MHz 时,温度越高,对应的两种鱼糜的介电损失率也越高;而在这一拐点频率之后,介电损失率与温度的相关性则完全相反,即随温度的升高而减小。例如,当温度从 30℃ 升高至 80℃,915 MHz 时,狭鳕鱼糜的介电损失率由 19.47 增加至 25.71,而在 2 450 MHz 时,其数值则从 16.59 下降到 11.46。Bengtsson 等^[6]通过实验

证明,在低频时,占主导地位的电导损失与温度成正相关,在高频范围内,起主导作用的水分的介电损失率则与温度成负相关性。因此出现在不同的频率,温度与介电损失率的相关性不一致。

2.3 预测方程及验证

运用 SPSS 软件对所测数据进行回归分析,两种鱼糜的介电常数和介电损失率的预测方程见表 2。

表 2 两种鱼糜介电常数和介电损失率的预测方程

Tab.2 Predictive equations for the dielectric constant and the loss factor of the two types of surimi

预测方程 predictive equations	适用范围 following variables		R_{adj}^2	P	序号 no.	
	温度(℃) temperature	频率(GHz) frequency				
介电常数 dielectric constant						
罗非鱼糜 tilapia surimi	$y = 72.727 - 0.344t - 2.303f$	30 ~ 80	0.32 ~ 2.96	0.975	< 0.01	(1)
狭鳕鱼糜 Alaska pollack surimi	$y = 71.085 - 0.416t - 3.373f$	30 ~ 80	0.32 ~ 2.96	0.997	< 0.01	(2)
介电损失率 loss factor						
罗非鱼糜 tilapia surimi	$y = 14.745 - 0.0566t - 6.754f$	30 ~ 80	0.32 ~ 0.98	0.732	< 0.02	(3)
	$y = 12.013 - 0.0698t + 2.096f$	30 ~ 80	0.98 ~ 2.96	0.923	< 0.01	(4)
狭鳕鱼糜 Alaska pollack surimi	$y = 46.828 + 0.216t - 36.490f$	30 ~ 80	0.32 ~ 1.35	0.787	< 0.01	(5)
	$y = 22.429 - 0.0724t - 1.718f$	30 ~ 80	1.35 ~ 2.96	0.754	< 0.01	(6)

方程(1)、(2)是两种鱼糜介电常数的预测方程,回归系数 R_{adj}^2 都在 0.97 以上,较好地反映了介电常数与温度和频率之间的关系。方程(3)~(6)是关于两种鱼糜介电损失率的预测方程。由于食品是一种多组分的复杂体系,对于建立介电损失率的预测方程较为困难^[7,14]。直接在 320 MHz 至 2 960 MHz 频率范围内对介电损失率进行回归时,方程的回归系数都小于 0.5;但按照曲线拐点将频率进行分段后,方程的回归系数明显提高到 0.7 以上,能较准确地反映介电损失率随温度和频率的变化趋势。

为了检验这些预测方程的准确性,本研究对 915 MHz 和 2 450 MHz 下两种鱼糜的介电常数和介电损失率的实验值和预测值进行了比较,结果如图 5、图 6 所示。罗非鱼鱼糜和狭鳕鱼糜分别简称为 TS 和 APS,实验值和预测值分别简称为 EV 和 PV,在图中分别用实点和虚线表示。

在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下,两种鱼糜介电常数的预测准确度较高,这与方程(1)和(2)的回归系数 R_{adj}^2 都大于 0.97 相符合。方程(3)~(6)对介电损失率的预测准确度相对较差,尤其是

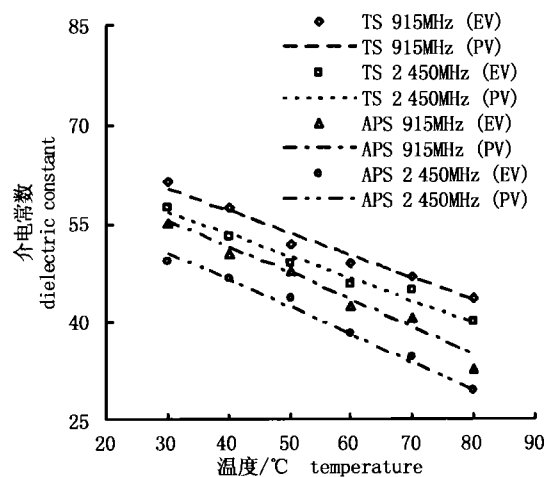


图 5 915 MHz、2 450 MHz 鱼糜介电常数的实验值(EV)与预测值(PV)的比较

Fig.5 Comparison of experimental and predictive value of dielectric constant of surimi at 915 MHz and 2 450 MHz

对狭鳕鱼糜 915MHz 时的预测偏差较大,这与介电损失率与温度关系的复杂性相一致。

由图可见,两种鱼糜介电常数和介电损失率的预测值和实验值具有较好的一致性,运用 SPSS

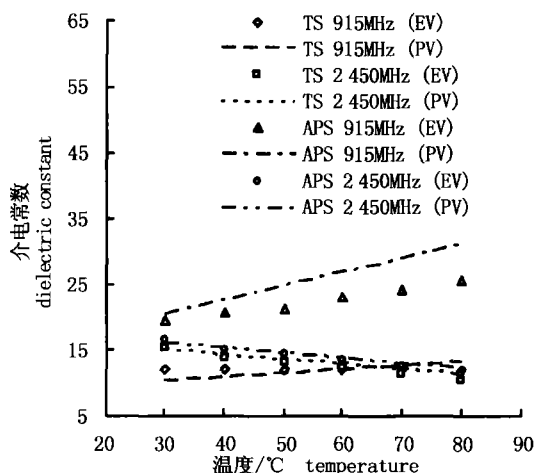


图6 915 MHz、2450 MHz 鱼糜介电损失率的实验值(EV)与预测值(PV)的比较

Fig.6 Comparison of experimental and predictive value of dielectric constant of surimi at 915 MHz and 2450 MHz

软件回归分析得到的预测方程能够有效地对鱼糜的介电特性进行预测。

2.4 穿透深度

穿透深度是指微波在穿过程中其能量减少为原来的 $1/e$ 之处距离表面的深度,可表征食品物料对微波能的衰减能力的大小,也是衡量微波加热食品内部温度分布情况的重要参数^[1,15]。穿透深度 D_p 可以由公式 2 计算求得。

$$D_p = \frac{c_0}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)}} \quad (2)$$

式中 $c_0 = 3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; f 为所测定的频率; ϵ' 和 ϵ'' 分别是测得的介电常数和介电损失率。

食品工业中常用的两种微波频率是 915 MHz 和 2450 MHz, 分别将实验值和预测方程得出的计算值代入方程 2 中, 比较结果见图 7。由图 7 可知, 在 915 MHz 频率下, 两种鱼糜的穿透深度均随温度升高而减小; 而 2450 MHz 时, 温度越高, 两种鱼糜的穿透深度越大。由公式 2 可知, 当频率一定时, 介电损失与穿透深度成负相关, 所以当频率为 915 MHz 时, 两种鱼糜的介电损失率都随温度升高而增加, 而穿透深度则随温度升高而减小; 2450 MHz 时, 穿透深度与温度的相关性正好相反。

分别由实验值和预测方程计算出的两种鱼糜的穿透深度值具有较好的一致性, 误差小于 5%。

915 MHz 和 2450 MHz 时, 罗非鱼鱼糜穿透深度分别比狭鳕鱼糜的大 76.3% 和 14.7%, 这说明鱼糜的穿透深度不仅与温度、频率等客观因素有关, 与鱼种本身的差异也有很大关系, 这可能是由于不同鱼种鱼糜的化学组成、蛋白质微观结构的差异等原因引起的。

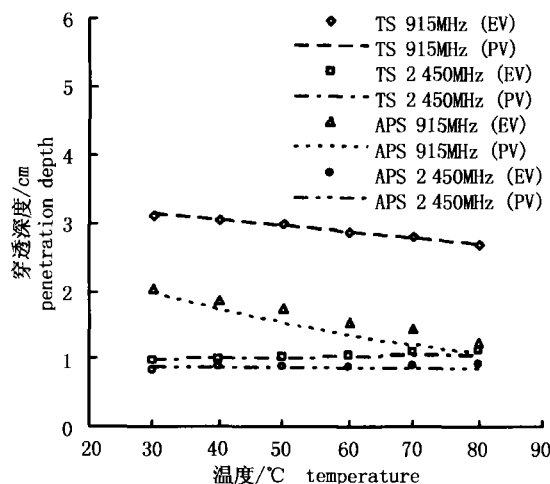


图7 温度对两种鱼糜穿透深度的影响

Fig.7 Penetration depths of two surimi affected by temperature at 915MHz and 2450MHz

3 结论

罗非鱼和狭鳕鱼糜的介电常数与温度和频率均成负相关性; 两种鱼糜的介电损失率随频率增加先减小后增大, 分别在 890 MHz 和 2450 MHz 拐点频率时取得最小值, 两种鱼糜的介电损失率在拐点频率前后分别与温度成正、负相关性; 在 915 MHz 和 2450 MHz 两种频率下, 两种鱼糜的穿透深度与温度的相关性正好相反。运用 SPSS 软件回归分析得到的预测方程能对两种鱼糜的介电特性进行有效预测。

本研究结论可为深入研究鱼糜等水产动物原料的介电特性提供一定参考, 同时也为通过调整鱼糜类食品成分以优化其微波加热适性提供一定依据。随着微波技术的不断发展和应用, 食品的介电特性研究将是一项重要而有意义的工作。

参考文献:

- [1] 王绍林. 微波食品工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [2] 井上千春, 羽仓义雄. 食品の赏味期限に關する研究[C]. 日本食品工学会第一回年次大会, 2000.71

- [3] Yaghmaee P, Durance T D. Predictive equations for dielectric properties of NaCl, D-sorbitol and sucrose solutions and surimi at 2450MHz[J]. J Food Science, 2001, 67(6): 2207-2211.
- [4] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [5] 高福成, 陈卫. 微波食品[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [6] Bengtsson N E, Risman P O. Dielectric properties of foods at 3GHz as determined by a cavity perturbation technique II. Measurements on food materials [J]. J Microwave Power, 1971, 6: 107-123.
- [7] Nelson S O. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of high moisture corn[J]. J Microwave Power, 1978, 13: 213-218.
- [8] Sun E, Datta A, Lobo S. Composition-based prediction of dielectric properties of foods [J]. J Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1995, 30(4): 205-212.
- [9] Cao Y, Cheng Y D, Wang X C, *et al.* Effects of heating methods on gel-forming ability of silver carp surimi[J]. J Shanghai Fish Univ, 2003, 12(suppl.): 78-85.
- [10] Piyasena P, Ramawamy H S. Dielectric properties of starch solutions as influenced by temperature, concentration, frequency and salt[J]. J Food Process Engineering, 2003, 26: 93-119.
- [11] Rajnish K, Calay M. Predictive equations for the dielectric properties of foods [J]. Int J Food Science and Technology, 1995, 29: 699-713.
- [12] Ohlsson T, Bengtsson N E. Dielectric food data for microwave sterilization[J]. J Microwave Power, 1975, 10: 93-108.
- [13] Mudgett R E. Electrical properties of foods[M]. New York: Marcel Decker Inc, 1995.
- [14] Goeneken D L, Tong C H. Dielectric properties of a pregelatinized bread system at 2450MHz as a function of temperature, moisture, salt and specific volume[J]. J Food Sci, 1997, 62: 145-150.
- [15] Calay R K, Newborough M. Predictive equations for the dielectric properties of foods [J]. Int J Food Science and Technology, 1995, 29: 699-713.