

## 温度、频率和水分含量对罗非鱼介电特性的影响

张保艳, 于海洋, 程裕东\*, 金银哲

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

**摘要:** 采用同轴探针法在温度 10~90°C、频率 300~3 000 MHz、干基水分含量 3.8590~0.1161 g/g d.b.的条件下对罗非鱼的介电特性值(介电常数  $\epsilon'$ , 介电损失率  $\epsilon''$ )进行了测定。结果显示, 罗非鱼 4 个部位(前部、中部、尾部、腹部)的介电常数相近, 最大部位差为 4.91, 平均部位差为 2.37; 4 个部位介电损失率变化趋势相同, 只有腹部的值偏小, 这是由于腹部脂肪含量相较于其他部位稍高。但是由于这种差别微小, 成分对介电损失率的影响可以忽略, 所以本研究中以 4 个部位介电常数、介电损失率的平均值为指标, 考察温度、频率、水分含量对罗非鱼介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )的影响。温度一定时, 介电常数随频率升高而降低; 频率一定时, 介电常数随温度升高而降低; 温度和频率一定时, 介电常数随水分含量的降低而急剧降低。频率的升高使得介电损失率呈先降低再升高趋势, 在 2 300 MHz 附近出现拐点, 拐点之前, 介电损失率随温度的升高而升高, 拐点之后, 介电损失率随温度的升高而降低。介电损失率随着水分含量的降低而降低。可算得罗非鱼在 915、2 450 MHz 频率下, 10~90 °C, 3.8590~0.1161 g/g d.b.时的穿透深度, 采用回归分析法得出罗非鱼介电特性值及穿透深度的回归预测方程, 预测值与实验值呈良好的一致性。

**关键词:** 罗非鱼; 介电特性; 穿透深度; 部位; 温度; 频率

**中图分类号:** TS 254.1

**文献标志码:** A

食品在微波加热干燥处理中, 介电特性、样品形状及尺寸、电场强度分布等因素会影响食品的内部温度分布并对产品的品质产生影响。当电场强度、尺寸及形状等一定时, 食品的介电特性是影响温度分布乃至干燥过程的关键因素。

介电特性即介电常数( $\epsilon'$ )和介电损失率( $\epsilon''$ )。介电常数反映了材料的电容性, 表征其存储电磁能的能力; 介电损失率反映材料的电阻性<sup>[1]</sup>, 即将电磁能转化为热能的能力。国内外研究者对食品的介电特性进行了广泛而深入的研究, 发现温度、水分含量和频率是影响食品介电特性的主要因素。Kumar 等<sup>[2]</sup>研究了工业生产中蔬菜泥的介电特性, 结果表明, 随着温度升高, 介电常数降低, 介电损失率升高。Sharma 等<sup>[3]</sup>研究了 2 450 MHz 下大蒜的介电特性与温度和水分含量的关系, 发现随着

水分含量的降低, 介电常数和介电损失率急剧降低, 而穿透深度却急剧升高。Guo 等<sup>[4]</sup>研究了水分含量(17.4%~42.6%)、温度(20~80 °C)、频率(10~4500 MHz)对蜂蜜介电特性的影响, 介电常数和介电损失率均随水分含量和温度升高而升高, 高水分含量和温度对介电特性值的影响较大, 而较低的水分含量和温度对介电特性值影响较小。Al-Muhtaseba 等<sup>[5]</sup>对不同水分含量、温度、频率下的面粉糊介电特性进行了考察。

除了水分含量、温度、频率对食品的介电特性有影响外, 盐和其他添加物也会对介电特性值产生影响。Jasim 等<sup>[6]</sup>考察了盐对黄油介电性质的影响。Basaran 等<sup>[7]</sup>对经微生物谷氨酰胺转氨酶处理后的鸡肉和鱼肉的介电特性进行了研究, 发现在射频(27~40 MHz)范围内, 经谷氨酰胺转氨酶处理

收稿日期: 2011-12-25 修回日期: 2012-04-20  
资助项目: 上海市科学技术委员会攻关项目(063919136)  
通讯作者: 程裕东, E-mail: ydcheng@shou.edu.cn

后的鸡肉,介电常数和介电损失率均有所升高。此外,Basaran-Akgul等<sup>[8]</sup>对温度(-5~130℃)和肌肉纤维取向对牛半腱肌肌肉介电性质的影响进行了研究。Soltani等<sup>[9]</sup>研究了介电特性与香蕉成熟度的关系。通过对上述研究发现,介电特性会对食品微波加热过程中的温度分布和食品品质等产生影响,反之,也可通过测量介电特性值来确定食品的内部特性,如水分含量,温度等。

然而在这些研究中,针对鱼类尤其是淡水鱼肉的介电特性研究较少。何天宝等<sup>[10]</sup>研究了温度和频率对罗非鱼鱼糜介电特性的影响。但考虑鱼糜和整块鱼肉成分、结构上的不同,本实验对不同温度及不同频率下的罗非鱼介电特性进行了研究。

罗非鱼是我国淡水养殖的重要品种之一,由于它生长速度快,环境适应能力强,仅需较低的营养条件就能生长和繁殖<sup>[11]</sup>。如今,我国罗非鱼每年种苗量及商品鱼产量均居世界第一<sup>[12]</sup>。但目前其加工方式主要为冷冻,形式单一。将鱼肉进行微波干燥处理,制成即食型鱼干、速食汤中干物成分等可提高鱼类的加工度。为了更好地预测控制、优化、罗非鱼在微波加热过程中的条件,实验以生鲜罗非鱼为对象,对在不同温度和频率条件下的介电特性进行研究,同时,考察罗非鱼在加工过程中水分含量的变化对介电特性的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

市购冷冻罗非鱼片(乐萌食品有限公司,上海)于-18℃下冷冻保藏。实验前,将样品取出,解冻备用。

将罗非鱼分成前部、中部、尾部、腹部等4部分进行实验<sup>[13]</sup>(图1)。采用微量凯氏定氮法,索氏抽提法,马弗炉灰化法,105℃烘箱直接干燥法分别对4部位的蛋白质、脂肪、灰分、水分含量进行测定。每次测定3组平行样品,取平均值(表1)。

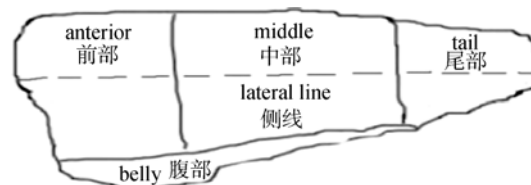


图1 实验中使用的罗非鱼各个部位名称<sup>[13]</sup>

Fig. 1 The names of four parts of tilapia used in this experiment

### 1.2 介电特性值的测定

采用同轴探针介电特性测定仪(安捷伦科技有限公司,N5230C 85070E)对样品的介电常数和介电损失率进行测定,仪器每次使用前用空气、短路金属块、去离子水进行校准,以消除装置、环境等引起的误差。

**罗非鱼片介电特性值的测定** 为了考察频率和样品温度对罗非鱼片介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )的影响,将样品从-18℃解冻至-3℃后,切成直径20mm、厚3mm的鱼片,放入内径为22mm的10mL烧杯底部,表面覆盖保鲜膜防止水分散失。从样品温度上升到10℃时开始,每隔10℃(铜镍热电偶测温仪,精度为 $\pm 0.1$ ℃)测定一次介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )(频率:300~3000MHz,频率间隔:5MHz),直到温度达到90℃时为止。每次测定3组平行样品,取平均值。

**不同水分含量下罗非鱼片介电特性值的测定** 为了考察水分含量对罗非鱼片介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )的影响,实验将样品从-18℃解冻至-3℃后切成直径20mm、厚3mm的鱼片,在(4 $\pm$ 0.5)℃冰箱中保存至少4h使内部水分分布均匀。随后,将鱼片以单圈摆放<sup>[14]</sup>的方式置于直径为145mm的培养皿中,放入微波炉( $P=500$ W)的转盘中央进行干燥,当干基含水率分别降为3.1200, 2.3822, 1.7487, 1.3332, 1.0361, 0.7540, 0.5478, 0.3853, 0.2841, 0.2128, 0.1742, 0.1240, 0.1161g/g d.b.时,将经干燥

表1 罗非鱼的基本成分( $n=3$ )  
Tab. 1 The composition of tilapia

样品部位 sample position	蛋白质% crude protein	脂肪% crude fat	灰分% ash	水分% moisture
前部 anterior	18.20 $\pm$ 0.11	0.78 $\pm$ 0.04	1.77 $\pm$ 0.03	79.44 $\pm$ 0.07
中部 middle	18.11 $\pm$ 0.02	0.91 $\pm$ 0.07	1.61 $\pm$ 0.01	79.30 $\pm$ 0.04
腹部 tail	18.14 $\pm$ 0.34	0.84 $\pm$ 0.02	1.64 $\pm$ 0.02	79.66 $\pm$ 0.20
尾部 belly	18.27 $\pm$ 0.05	1.15 $\pm$ 0.20	1.38 $\pm$ 0.02	79.28 $\pm$ 0.09

的样品恒温至 30 ℃, 进行介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )的测定, 每次测定 3 组平行样品, 取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 部位对罗非鱼介电特性值的影响

由于鱼的部位可能影响介电加热, 所以对罗非鱼的 4 个部位的介电特性( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )进行了考察。如

表 2 所示, 频率一定时, 罗非鱼各部位的介电常数相近。最大部位差为 4.91, 平均部位差为 2.37。

4 个部位的介电损失率整体呈相同的变化趋势, 但是相对于其他部位, 腹部介电损失率偏小。是因为罗非鱼 4 个部分的组分有差异(表 1), 罗非鱼的各部位的组分相近, 只有脂肪含量相差稍大, 腹部脂肪含量相较于其他部位稍高。但由于本实验

表 2 罗非鱼 4 个部位的介电特性值  
Tab. 2 Dielectric properties for tilapia at four parts

频率 frequency	温度/℃ temperature	前部 anterior	中部 middle	尾部 tail	腹部 belly	
915 MHz	$\epsilon'$	10	66.30±0.87	64.62±4.97	64.32±0.56	64.29±2.10
		20	62.87±2.44	62.64±1.28	63.20±0.10	62.58±1.28
		30	62.39±0.80	61.87±0.91	61.64±0.79	60.78±1.25
		40	61.33±1.61	58.16±0.39	58.93±1.10	57.34±0.44
		50	58.94±2.90	55.82±2.89	56.38±0.04	56.66±0.78
		60	56.61±1.89	55.28±2.16	54.82±1.48	54.40±1.03
		70	53.97±4.54	52.50±0.94	53.00±0.04	51.51±1.73
		80	51.27±1.44	50.98±2.05	52.24±2.11	49.86±2.01
		90	48.84±2.36	50.38±2.18	50.75±0.65	48.35±1.66
	$\epsilon''$	10	20.09±0.37	20.44±0.59	18.04±2.14	17.15±2.20
		20	20.59±0.89	19.84±0.37	18.77±1.56	19.08±2.22
		30	22.75±1.19	21.98±2.26	20.79±1.83	20.51±1.94
		40	24.80±1.59	21.56±0.92	20.92±1.02	21.48±3.55
		50	25.60±1.13	25.72±1.41	22.17±0.58	22.36±2.72
		60	27.19±1.61	27.48±0.01	26.71±4.05	24.37±1.95
		70	26.31±1.04	28.78±2.84	25.65±4.82	24.82±3.62
		80	30.17±5.32	28.88±0.42	30.27±0.50	26.14±1.59
		90	30.83±2.58	31.98±2.54	30.94±0.42	26.74±0.74
2 450 MHz	$\epsilon'$	10	61.43±1.06	59.94±4.79	59.93±0.15	60.41±2.09
		20	58.42±2.16	58.66±1.71	58.42±0.38	58.19±0.48
		30	58.48±1.02	57.30±0.95	57.25±0.33	56.10±0.79
		40	56.93±2.03	54.09±0.18	52.78±1.96	53.30±0.22
		50	54.48±3.28	51.32±2.38	52.42±0.59	52.22±0.86
		60	51.81±1.77	49.53±1.32	50.39±0.76	49.62±0.53
		70	51.69±9.35	47.70±0.69	48.16±0.16	46.78±1.40
		80	45.66±2.10	44.94±1.64	45.56±0.48	44.27±0.79
		90	43.61±1.99	44.18±1.29	44.60±0.94	42.90±0.55
	$\epsilon''$	10	17.42±0.11	16.15±1.21	16.51±0.88	15.73±0.55
		20	16.34±0.36	15.44±0.36	15.59±0.59	15.22±0.97
		30	15.94±0.29	15.35±0.19	14.98±0.68	14.57±0.84
		40	15.71±0.60	14.93±0.16	14.03±0.49	13.86±1.62
		50	15.63±0.74	14.90±1.22	14.08±0.24	13.78±0.98
		60	15.67±0.71	15.08±0.60	14.28±0.62	14.07±1.06
		70	15.76±2.41	15.13±0.26	14.33±1.30	13.82±1.47
		80	15.76±0.06	14.80±0.96	14.38±1.12	13.70±1.20
		90	15.77±0.29	14.43±0.67	15.170.41	13.92±0.64

中罗非鱼脂肪含量较低, 这种差别并不显著。这与 Herve 等<sup>[15]</sup>研究一致, 当总脂肪含量小于 4%时脂肪含量对介电损失率的影响很小, 成分对介电损失率的影响可以忽略。

### 2.2 频率和温度对罗非鱼介电特性值的影响

**介电常数** 介电常数随频率的升高而降低, 90 °C时介电常数由 300 MHz 时的 59.47 下降到 3 000 MHz 的 42.52, 下降了 28.50%(图 2)。这可能是由于食品中水分对介电常数影响最大, 而纯水的介电常数随频率的升高而降低<sup>[16]</sup>。

频率一定时, 介常数随温度的升高而降低, 这可能是由于温度升高, 分子间振动加剧打乱了水分子间的有序排列<sup>[13]</sup>, 导致其存储电磁能的能力减弱。

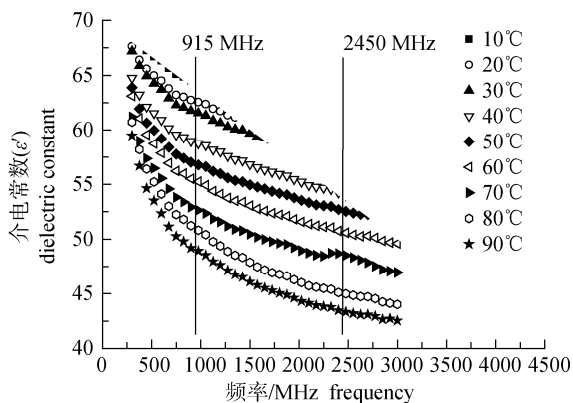


图 2 频率对罗非鱼介电常数的影响  
Fig. 2 The effect of frequency on the dielectric constant of tilapia

**介电损失率** 温度一定时, 介电损失率随频率的增加呈先减小后增大的趋势, 中间出现一个拐点(图 3)。在相同的频率下, 拐点之前, 介电损失率随温度的升高而升高, 拐点之后, 则随温度的升高而降低, 这表明在低频率下离子传导占主导优势, 而随着频率的升高, 离子传导功能减弱, 被逐渐加强的偶极旋转所替代。与何天宝等<sup>[10]</sup>罗非鱼鱼糜的介电损失率相比, 曲线拐点的位置有所差异, 前者约在 890 MHz, 而本实验中约在 2 300 MHz 出现拐点, 这可能是由于温度对罗非鱼介电损失率的影响由罗非鱼中自由水的含量和可溶性离子决定<sup>[17]</sup>。水分含量高的食品, 影响介电损失率的两个主要因素是偶极子损失和离子损失。偶极子损失来自水分子的转动, 在微波频率下, 它随温度

的升高而降低。离子损失来自于离子迁移, 随着温度的升高而升高。罗非鱼制成鱼糜的过程中, 组织结构被破坏, 水溶性离子溶出, 导致离子损失对介电损失率影响减弱。

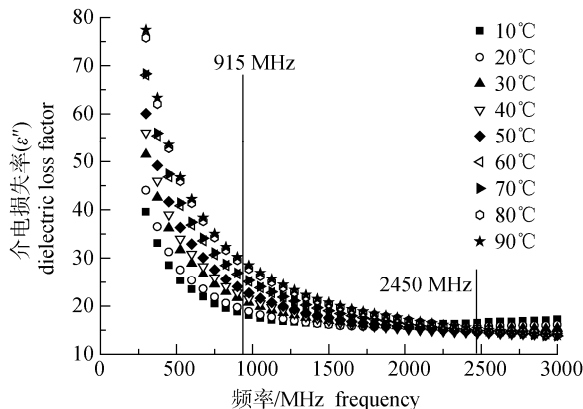


图 3 频率对罗非鱼介电损失率的影响  
Fig. 3 The effect of frequency on the dielectric loss factor of tilapia

**穿透深度** 穿透深度( $d_p$ )是指微波在穿透过程中其振幅衰减到原来的  $1/e(e=2.718)$ 之处距离表面的深度<sup>[18]</sup>, 穿透深度通常用于选择内容的合适厚度, 使加热过程更为均匀<sup>[19]</sup>。定义为

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

式中,  $c_0=3 \times 10^8$  m/s, 为微波在真空中传播的速度;  $f$  为所应用的频率;  $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$  分别为介电常数和介电损失率。

在 915 MHz 和 2 450 MHz 下, 温度由 10 °C 上升到 90 °C, 罗非鱼的穿透深度由 2.26 cm(915 MHz)和 0.93 cm(2 450 MHz)分别降至 1.28 cm(915 MHz)和 0.88 cm (2 450 MHz)(表 3)。在上述温度范围内, 915 MHz 对罗非鱼的穿透深度的影响明显大于 2 450 MHz。此外, 在整个温度范围内, 915 MHz 时的穿透深度值均大于相同温度下 2 450 MHz 时的穿透深度值。这与何天宝等<sup>[10]</sup>以罗非鱼鱼糜、杨松等<sup>[20]</sup>以鲢鱼糜复合素的介电特性研究中得到的结果一致。

**回归分析** 采用软件 Origin 8.0 对 915 MHz、2450 MHz 下罗非鱼的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )及穿透深度与温度的关系进行回归分析, 得到的多

表 3 不同温度下罗非鱼微波穿透深度的变化

Tab. 3 Radiation penetration depth (cm) for tilapia fillet as a function of temperature at 915 MHz and 2450 MHz

	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
915 MHz	2.26	2.14	1.94	1.84	1.69	1.51	1.48	1.34	1.28
2450 MHz	0.93	0.96	0.98	0.99	0.98	0.95	0.93	0.91	0.88

项式方程(表 4)。可以预测不同温度范围内罗非鱼片的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) 及穿透深度值, 也可用于介电加热的计算机模拟研究。从表 4 可以看出,  $Adj-R^2$  均大于 0.9624, 实验值与预测值体现了良好的一致性。实验条件下, 罗非鱼介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) 的实验值与预测值拟合情况如图 4 所示。

### 2.3 水分含量对罗非鱼介电特性值的影响

**介电常数和介电损失率** 水分含量对罗非鱼片介电常数、介电损失率的影响如图 5 所示, 随着水分含量的降低, 罗非鱼的介电常数急剧降低。以 915 MHz 为例, 水分含量从 3.8590 g/g d.b. 降至 0.1161 g/g d.b. 时, 罗非鱼的介电常数从 61.67 下降到 1.55, 降幅为 97.49%, 远远大于温度对介电常数的影响, 这与 Guo 等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

水分含量的降低导致罗非鱼的介电损失率随之降低。水分含量为 3.8590 g/g d.b. 时,  $\epsilon''=21.5075$ , 而当水分含量为 0.1161 g/g d.b. 时,  $\epsilon''=0.1313$ , 下降了 99.39%。Feng 等<sup>[22]</sup>指出当水分含量 > 70%, 自由水含量和离子传导是影响介电性质的主要因素。

**穿透深度** 随着水分含量的下降, 穿透深度呈急剧上升趋势。频率为 915 MHz 时, 穿透深度由 3.8590 g/g d.b. 时的 1.94 cm 上升到 0.1240 g/g d.b.

时的 46.54 cm, 约为前者的 24 倍。说明随着水分含量的降低, 微波的穿透能力减弱, 表面加热增强, 内部加热减弱。罗非鱼片将电磁能转换成热能的能力减弱, 导致样品的升温速度降低。

**回归分析** 采用软件 origin8.0 对 915 MHz、2450 MHz 下罗非鱼的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) 与水分含量的关系进行回归分析(表 6), 得到的多项式方程, 可以预测在实验水分含量范围内罗非鱼片的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ), 也可并用于介电加热的计算机模拟研究。从表 6 可以看出, 除 2450 MHz 时穿透深度与水分含量关系方程的  $Adj-R^2$  小于 0.9740 外 (0.8577), 其他情况下  $Adj-R^2$  均大于 0.9740, 实验值与预测值体现了良好的一致性。实验条件下, 罗非鱼介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) 的实验值与预测值拟合情况如图 5 所示。

### 3 结论

本实验采用同轴探针法测定了罗非鱼各个部位在不同温度、频率下的介电特性值。结果表明, 罗非鱼各个部位的介电常数相近, 腹部的介电损失率偏小。介电常数随频率升高而降低; 随温度升高而降低。随着频率的升高, 罗非鱼的介电损失率先降低再升高, 在 2300 MHz 附近出现拐点。拐点

表 4 915、2450 MHz 下罗非鱼的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) 与温度(10~90°C)关系预测方程  
Tab. 4 Predictive equations for the dielectric properties ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) of tilapia as a function of temperature (T) from 10°C to 90°C at 915 MHz and 2450 MHz

		回归方程 $Y=aT^3+bT^2+cT+d$ regression equation				
		$a(^{\circ}\text{C}^{-3})\times 10$	$b(^{\circ}\text{C}^{-2})\times 10^3$	$c(^{\circ}\text{C})\times 10^5$	$d\times 10^{-1}$	$Adj-R^2$
915MHz	$\epsilon'$	-1.1348	-2.0600	1.4219	6.6120	0.9965
	$\epsilon''$	0.6495	1.5400	-0.8574	1.8027	0.9785
	$d_p$	-0.1406	-0.0424	0.0657	0.2409	0.9904
2450 MHz	$\epsilon'$	-1.2644	-1.5500	0.7870	6.1768	0.9922
	$\epsilon''$	-1.3829	2.0400	-0.9545	1.7662	0.9624

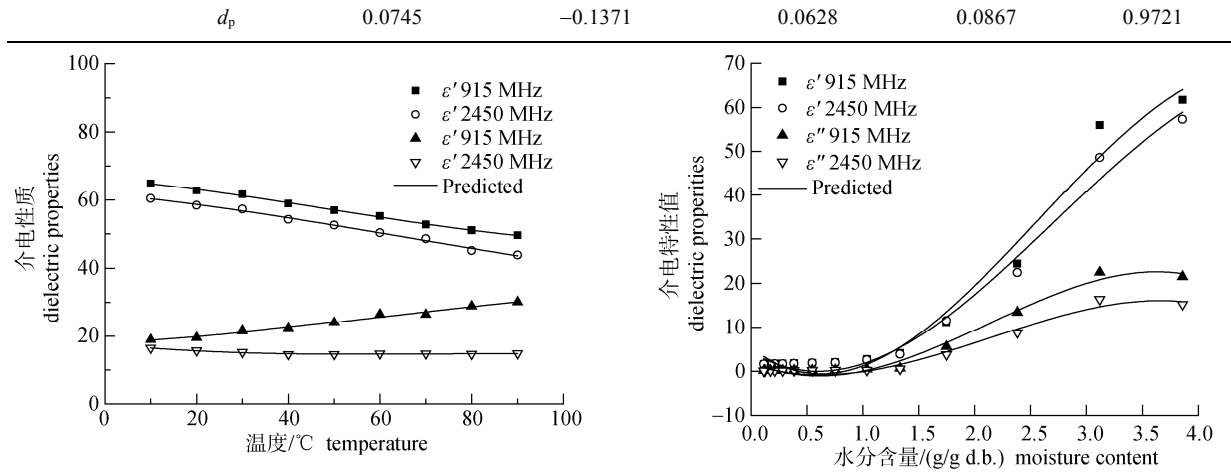


图 4 915、2 450 MHz 下罗非鱼的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )与温度关系的实验值与预测值比较  
 Fig. 4 Dielectric properties ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) versus temperature, comparing experimental data and the predicted curve

图 5 915 MHz、2 450 MHz 下水分含量对罗非鱼介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )的影响( $T=30^\circ\text{C}$ )  
 Fig. 5 The effect of moisture content on the dielectric properties ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) of tilapia at 915 MHz and 2450 MHz ( $T=30^\circ\text{C}$ )

表 5 不同水分含量下罗非鱼的穿透深度( $T=30^\circ\text{C}$ )  
 Tab. 5 Radiation penetration depth (cm) for tilapia fillet as a function of moisture content at 915 MHz and 2450 MHz ( $T=30^\circ\text{C}$ )

水分含量/(g/g d.b.) moisture content	915 MHz		2450 MHz		水分含量/(g/g d.b.) moisture content	915 MHz		2450 MHz			
	cm		cm			cm		cm			
3.8590	1.94	0.98	0.5478	32.13	25.29	3.1200	1.77	0.84	0.3853	32.25	25.74
2.3822	1.99	1.07	0.2841	38.99	30.90	1.7487	3.20	1.79	0.2128	40.61	32.76
1.3332	15.83	8.25	0.1742	42.19	42.25	1.0361	20.62	13.90	0.1240	46.54	59.10
0.7540	29.85	18.76	0.1161	49.54	64.76						

表 6 915、2450MHz 下罗非鱼的介电特性值( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ )与水分含量关系预测方程  
 Tab. 6 Predictive equations for the dielectric properties ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) of tilapia as a function of moisture content (g/g d.b.) at 915 MHz and 2450 MHz

		回归方程 $Y=aT^3+bT^2+cT+d$ regression equation				
		$a(\text{g/g d.b.}^{-3})$	$b(\text{g/g d.b.}^{-2})$	$c(\text{g/g d.b.})$	$d \times 10^{-1}$	$Adj-R^2$
915 MHz	$\epsilon'$	-20.2001	18.3778	-2.3849	5.3851	0.9744
	$\epsilon''$	2.18953	-11.4509	10.9715	-1.7267	0.9814
	$d_p$	-38.0663	8.8417	-0.5636	50.0834	0.9740
2 450 MHz	$\epsilon'$	-15.6158	14.6406	-1.7972	4.4303	0.9843
	$\epsilon''$	-8.2236	7.7502	-1.2075	1.5402	0.9748
	$d_p$	-74.1988	30.7411	-4.0052	58.0938	0.8577

之前,介电损失率随温度的升高而升高,拐点之后,介电损失率随温度的升高而降低。罗非鱼的穿透深度在 915 MHz 时随温度升高而急剧下降,在 2 450 MHz 时下降缓慢。水分含量对罗非鱼介电特性的影响较大。介电常数与介电损失率随着水分含量的

降低而急剧下降。本实验还对罗非鱼在不同条件下的穿透深度进行了研究,结果表明,穿透深度随温度升高而降低,随水分含量的降低而升高。此外,采用回归分析法得到了在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下,可以预测罗非鱼介电特性值、穿透深度随

温度和水分含量变化的回归方程, 除 2 450 MHz 时穿透深度与水分含量关系方程的  $Adj-R^2$  小于 0.9624 外(0.8577), 其他情况下  $Adj-R^2$  均大于 0.9624。预测值与实验值相关性良好。

#### 参考文献:

- [1] 万璋, 钟芳, 徐良增, 等(译). 食品科学[M]. 5 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 181-182.
- [2] Kumar P, Coronel P, Truong V D, *et al.* Overcoming issues associated with the scale-up of a continuous flow microwave system for aseptic processing of vegetable purees[J]. *Food Research International*, 2008, 41 (5) : 454-461.
- [3] Sharma G P, Prasad S. Dielectric properties of garlic (*Allium sativum* L.) at 2450MHz as function of temperature and moisture content[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(4): 343-348.
- [4] Guo W, Liu Y, Zhu X, *et al.* Temperature-dependent dielectric properties of honey associated with dielectric heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(3): 209-216.
- [5] Al-Muhtaseba A H, Hararah M A, Megahey E K, *et al.* Dielectric properties of microwave-baked cake and its constituents over a frequency range of 0.915-2.450 GHz [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(1): 84-92.
- [6] Jasim A, Hosahalli S R, Vijaya G S R. Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(3): 351-358.
- [7] Basaran P, Basaran-Akgul N, Rasco B A. Dielectric properties of chicken and fish muscle treated with microbial transglutaminase[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120 (2): 361-370.
- [8] Basaran-Akgul N, Basaran P, Rasco B A. The effect of temperature (5 to 130 °C) and muscle fiber orientation on the dielectric properties of beef semitendinosus muscle at radio frequency and microwave frequencies[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(3): 243-249.
- [9] Soltani M, Alimardani R, Omid M. Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(4): 625-631.
- [10] 何天宝, 程裕东. 温度和频率对鱼糜介电特性的影响 [J]. *水产学报*, 2005, 29(2): 252-257.
- [11] El-Sayed A F M. *Tilapia culture*[M]. Oxford: CABI Publishing, 2006.
- [12] 吴燕燕, 李来好. 罗非鱼片干的微波烘烤技术[J]. *渔业现代化*, 2002 (3): 31-33.
- [13] Wang Y, Tang J, Rasco B, *et al.* Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(2): 236-246.
- [14] Zhang B Y, Jin Y Z, Cheng Y D. Microwave drying of tilapia fillets: kinetics and modeling[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 396-398: 1306-1312.
- [15] Herve A G, Tang J, Luedecke L, *et al.* Dielectric properties of cottage cheese and surface treatment using microwaves[J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 37 (4): 389-410.
- [16] Bengtsson N E, Rismna P O. Dielectric properties of foods at 3GHz as determined by a cavity perturbation technique II. Measurements on food materials[J]. *Journal of Microwave Power Electromagn*, 1971, 6(2): 107-123.
- [17] Nelson S O, Bartley P G. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of food materials [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(4): 1223-1227.
- [18] 高福成, 陈卫. *微波食品*[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.
- [19] Wang Y F, Wig T D, Tang J M, *et al.* Dielectric properties of foods related to RF and microwave pasteurization and sterilization[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 57(1): 257-268.
- [20] 杨松, 刘世雄, 程裕东. 915MHz 和 2450MHz 频率下温度和大豆分离蛋白对白鲢鱼糜复合素材介电特性的影响[J]. *水产学报*, 2011, 35(1): 131-138.
- [21] Guo W, Tiwari G, Tang J, *et al.* Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(2): 217-224.
- [22] 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.

## Effects of temperature, frequency, and moisture content on the dielectric properties of tilapia

ZHANG Bao-yan, YU Hai-yang, CHENG Yu-dong\*, JIN Yin-zhe

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The dielectric properties of tilapia at different parts (anterior, middle, tails, belly), different temperatures (10-90 °C), different frequencies (300-3 000 MHz), and different moisture contents (3.8590-0.1161 g/g d.b. (dry basis)) were determined using the coaxial line method. The dielectric constants of tilapia among four parts were similar, the greatest difference was 4.91, and the average difference was 2.37. Four parts of tilapia were the same in variation trend of dielectric loss, but the value of belly was lower than that of others. This is perhaps the fact that It is maybe the fat content of belly was higher than other parts. However, due to the differences were small, the effects of components on dielectric loss can be ignored. For this reason, the average of dielectric properties values( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) for four parts were employed to investigate the effect of temperature, frequency, moisture content on tilapia dielectric properties value ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ). In addition, the dielectric constant of tilapia decreased with the increase of frequency and temperature, and decreased along with the decrease of moisture content. However, with the increase of frequency, the dielectric loss decreased to a minimum (2 300 MHz) and then increased. When the frequency was lower than 2 300 MHz, dielectric loss increased as the temperature increased, and when the frequency was higher than 2 300 MHz, it was contrary. The dielectric loss also decreased with the decrease of moisture content. Moreover, the penetration depth[Frequency: 915, 2 450 MHz; Temperature: 10-90 °C; Moisture content: 3.8590-0.1161 g/g d.b. (dry basis)] of tilapia was calculated, regression analysis was employed to develop polynomial equations of dielectric properties and penetration depth. The predicted values and the experimental values were well correlated.

**Key words:** tilapia; dielectric properties; penetration depth; parts; temperature; frequency

**Corresponding author:** CHENG Yu-dong. E-mail: ydcheng@shou.edu.cn