

## 包装尺寸、形状对罗非鱼片微波复水特性的影响

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:** 为了提高复水速率, 增强复水效果, 本研究采用微波加热的方式, 对罗非鱼片进行复水。将提前干燥至水分含量为 0.100 0 g/g d. b. (干基) 的罗非鱼片放入亚克力材料制成的、不同尺寸和形状的容器内, 进行微波复水, 考察包装容器尺寸、形状及盐含量对微波复水特性的影响。结果显示, 随着复水时间的延长, 鱼片的含水率逐渐增高, 在 250 ~ 300 s 左右达到最大值并保持稳定。但复水后的样品水分含量没有达到样品的初始水分含量(3.859 0 g/g d. b.)。这表明, 复水过程是不可逆的, 干燥过程中细胞缩水和组织结构破坏导致样品的复水能力下降。实验条件范围内, 容量大的容器较利于微波复水( $V=115\ 455\ \text{mm}^3$ ); 相较于方形容器, 圆形容器更利于罗非鱼片的微波复水。添加 NaCl 可以增大汤料的介电损失率, 使其复水速率增加, 复水效果更好。研究表明, 微波复水约需 240 s 就可以达到平衡, 比传统的水浴复水(约 700 s)可节约约 2/3 的时间。引用 Peleg 模型和 Weibull 模型对实验数据进行拟合, Peleg 模型对实验数据的拟合度更高, 预测值与实验值呈良好的一致性, 更适合描述罗非鱼片的复水过程。

**关键词:** 罗非鱼片; 复水; 微波; Peleg 模型; Weibull 模型

**中图分类号:** S 983

**文献标志码:** A

食品在干燥过程中, 发生了很多重要的变化, 如结构和物理、化学性质的改变, 最终影响食品的质量。复水是干燥脱水对材料损害程度的一种量度, 随着复水时间的增加, 干物料的水分含量增加, 最终达到平衡值, 平衡值的大小体现样品恢复到新鲜物料的程度。人们总是希望复水后的产品能恢复到新鲜样品的品质如质构、色度等。然而, 研究表明, 复水后的样品水分含量无法恢复到鲜样水平, 这说明脱水过程是不可逆的。复水是一个复杂的过程, 不能简单的看成是脱水的逆过程。很多不同的因素影响复水过程, 如漂烫引起的组成的变化、干燥方法和过程、物理结构、化学组分、介质特性、样品的体积和密度、水中的盐含量等。干物质的复水由 3 个同时发生的过程组成, 干物质吸水、膨胀、可溶性物质的浸出。研究干制品的复水特性, 对于优化食品的加工工艺非常有用。

食品在干燥过程中会发生细胞破裂和组织缩水等变化, 导致样品持水能力减弱。如何控制干燥过程, 尽量避免细胞的破裂和组织缩水, 是研究者面临的一大重要课题, 关系到干燥加工业的发展前景。在众多干燥方法当中, 微波以其加热时间短、效果显著等优点用于食品物料的干燥<sup>[1-6]</sup>、杀菌<sup>[7-11]</sup>等领域。微波与食品材料的相互作用很大程度上取决于食品材料的介电特性。食品的介电特性受到很多因素影响, 如频率、温度、水分含量、样品的形状尺寸以及食品的组分等, 特别是盐和脂肪含量<sup>[12]</sup>。随着微波炉走进千家万户, 人们对干制品的复水不仅局限于直接冲泡, 而是将干制品与水以一定比例混合, 进行微波复水<sup>[13-16]</sup>。这种复水方式速度快, 不需要提前准备热水, 因此受到了人们广泛欢迎。为了更好的研究食品的复水过程, 国内外的研究者基于菲克第二定律提出了很多经验方程, Peleg<sup>[17]</sup>在

收稿日期:2013-06-04 修回日期:2013-09-07

资助项目:上海市科委部分地方院校能力建设项目(12290502200);上海高校知识服务平台-上海海洋大学水产动物遗传育种中心(ZF1206);云南省科技厅院省校科技合作专项(2012IB016);国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA101702)

通信作者:金银哲, E-mail: yzjin@shou.edu.cn; 程裕东, E-mail: ydcheng@shou.edu.cn

1988年提出了描述奶粉和全麦粉的经验方程,可以应用于菠菜(*Spinacia oleracea*)、胡萝卜(*Daucus carota*)、鹰嘴豆(*Cicer arietinum*)等<sup>[18]</sup>多种物料的复水过程。另一个描述食品物料复水过程的经验方程是 Weibull 方程<sup>[19]</sup>,由于这2个方程简单、适用性强,因此被广泛应用于食品领域。

罗非鱼是我国淡水养殖业的重要品种之一,由于它生长速度快,适应环境能力强,仅需较低的营养条件就能生长和繁殖,因此被形象的称为“水生鸡肉”<sup>[20]</sup>。而且罗非鱼富含甘氨酸和谷氨酸,肉质鲜甜;蛋白质含量高,所以罗非鱼不仅受到水产养殖工作者的欢迎,同时也得到了消费者的青睐。如今,我国罗非鱼每年种苗量及商品鱼产量均居世界第一,罗非鱼的产量有超过传统“四大家鱼”之势,堪称我国淡水养殖的“第五大家鱼”<sup>[21]</sup>。但目前其加工方式主要为冷冻出口,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。将干燥后的鱼片进行复水时可考虑采用方便、简单的微波复水方式。采用微波复水时,食品的复水效果不仅取决于复水时间、微波频率等因素,也要考虑产品的形状、尺寸等对复水特性的影响。因为不同的形状和尺寸对平衡水分、复水速率等会产生不同的效果,但至今还没有相关研究。本研究团队在之前的工作中,采用同轴探针法确定了不同温度、频率、干基水分含量条件下罗非鱼的介电特性值(介电常数  $\epsilon'$ , 介电损失率  $\epsilon''$ )<sup>[22]</sup>,并以罗非鱼片的微波干燥特性为研究内容,采用不同功率微波对罗非鱼片进行干燥处理,获得干燥曲线等特性数据,确定了最佳干燥模型<sup>[23]</sup>。在此基础上,为了考察和掌握罗非鱼片的复水特性,通过工艺优化缩短鱼片复水时间,提高鱼片品质,提高家庭操作的可控性,本研究考察了不同包装尺寸、形状及含盐量对罗非鱼片在微波条件下复水时的影响,为微波复水的广泛应用提供基础数据和理论依据。

## 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  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  下冷冻保藏。实验前,将样品取出,解冻备用。将样品切成宽 20 mm、厚 3 mm 的薄片,在微波功率 150 W 下干制到水分含量为 0.100 0 g/g d. b., 备用。NaCl 为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

实验所用仪器和设备有 BS 224S 赛多利斯分析天平,德国 Sartorius 集团;DHG-9245A 电热鼓风干燥箱,上海慧泰仪器制造有限公司;FISO 微波工作站,加拿大 FISO 技术公司;FOT-L-SD 光纤温度传感器,加拿大 FISO 技术公司;NN-GD568M 松下微波炉,上海松下微波炉有限公司;THERMIC MODEL 2100A 热电偶测温仪,日本江藤 ETO DENKI 公司。

### 1.3 实验方法

**水浴复水** 取在微波功率 150 W 下干制到水分含量为 0.100 0 g/g d. b. 的 30 片罗非鱼片,分为 5 组,每组 6 片。每组鱼片分别与 20 mL 的去离子水一起放入 25 mL 烧杯中,置于水温分别为 25、40、60、80、100  $^{\circ}\text{C}$  的水浴锅内进行复水。每隔一定时间取出鱼片称重并记录,操作过程控制在 10 s 之内,复水过程持续 1 h。每组测定 3 次,取平均值。

**微波复水** 将在微波功率 150 W 下干制到水分含量为 0.100 0 g/g d. b. 的 6 片罗非鱼片,分别与 20 mL 的去离子水一起放入亚克力材料制作成的容器内,容器的尺寸及形状如表 1。在容器外面紧密包裹聚苯乙烯(除上表面外),使样品与周围环境的热交换降到最低。将包有保温层的样品置于微波炉转盘的中心,并在样品中心部位插入光纤温度传感器用于监测记录微波加热过程中样品的升温情况。每隔一定时间取出鱼片称重并记录,操作控制在 10 s 之内,复水过程持续 10 min。每组测定 3 次,取平均值。

表 1 容器尺寸

Tab. 1 Size of geometric shapes container

容积 $V/\text{mm}^3$ volume	方形 cube			圆柱形 cylinder		
	底边长 $L/\text{mm}$ bottom length	底面积 $S/\text{mm}^2$ bottom area	高 $H/\text{mm}$ height	内径 $R/\text{mm}$ internal diameter	底面积 $S/\text{mm}^2$ bottom area	高 $H/\text{mm}$ height
51 600	41.5 (small)	1 720.0	30.0	46.8 (small)	1 720.0	30.0
73 890	49.6 (middle)	2 463.0	30.0	56.0 (middle)	2 463.0	30.0
115 455	62.0 (big)	3 848.5	30.0	70.4 (big)	3 848.5	30.0

#### 1.4 理论解析

在本研究中,为了确定复水时间和复水特性的函数关系,分别采用了 Peleg[式(1)和式(2)]和 Weibull 方程[式(3)]对实验数据进行拟合。

$$M_t = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1)$$

式中, $M_t$  为复水  $t$  时刻的水分含量(g/g d. b.);  $M_0$  为复水前的初始水分含量(g/g d. b.);  $t$  为复水时间 s;  $k_1$  为模型的动力学常数[s(g d. b./g)],  $1/k_1$  与物料初始复水速率呈正相关;  $k_2$  为模型的特征常数(g d. b./g),  $1/k_2$  与平衡水分含量呈正相关。

如果复水时间足够长,平衡水分含量可由以下公式得出;

$$M_e = M_0 + \frac{1}{k_2} \quad (2)$$

式中, $M_e$  为平衡水分含量;

$$M_t = M_e + (M_0 - M_e) \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

式中, $\alpha$  为形状参数; $\beta$  为尺寸参数(水分吸收 63% 所需的时间 s, 表征水分吸收速率)。

## 2 结果

### 2.1 复水温度对罗非鱼片复水特性的影响

为了研究复水温度对罗非鱼片复水特性的影响,将在微波功率 150 W 下干制到水分含量为 0.100 0 g/g d. b. 的罗非鱼片放入 25, 40, 60, 80, 和 100 °C 的去离子水浴中复水。复水时间和水分含

量的关系如图 1 所示。在开始的 1 000 s, 随着复水时间的增加, 水分含量以较高的速率增加, 随后达到平衡。结果显示, 温度越高, 水分含量最大值越高, 达到最大值所需时间越短。

Peleg 模型和 Weibull 模型对实验数据的拟合情况如表 2 所示。实验范围内, Adj.  $R^2$  均大于等于 0.972 5, 相应的  $X^2$  和 RSS 均分别小于或等于  $2.130 0 \times 10^{-3}$  和  $2.976 0 \times 10^{-2}$ , 这表明模型与实验数据的相关性良好, 这 2 个模型都可以用来描述罗非鱼片在实验条件下的复水动力学。但相比较于 Weibull 模型, Peleg 模型的 Adj.  $R^2$  较高,  $X^2$  和 RSS 较低, 可以更好的拟合实验数据, 更适合描述罗非鱼片的复水特性。

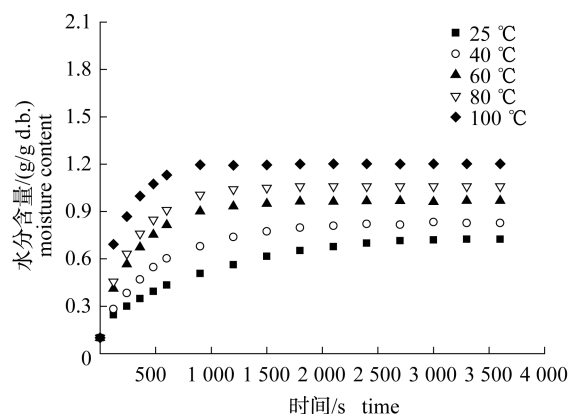


图 1 不同复水温度下罗非鱼片的复水特性  
Fig. 1 Moisture content of tilapia fillets at different rehydration temperatures

表 2 不同温度下罗非鱼片复水模型的参数及数值分析

Tab. 2 Estimated parameters and statistical analysis of rehydration models of dried tilapia fillets in different temperatures

模型 model	温度/°C temperature	$k_1$ / [s(g d. b./g)]	$k_2$ / (g d. b./g)	$M_e$ / (g/g d. b.)	$X^2 \times 10^{-4}$	RSS $\times 10^{-2}$	Adj. $R^2$
Peleg	25	964.168 8	1.298 7	0.870 0	1.959 6	0.274 0	0.995 1
	40	502.213 2	1.190 9	0.939 7	2.129 3	0.298 0	0.995 9
	60	234.493 9	1.051 3	1.051 2	5.005 9	0.701 0	0.992 1
	80	195.047 9	0.951 7	1.150 7	8.229 9	1.152 0	0.989 4
	100	91.708 9	0.859 7	1.263 2	7.445 7	1.042 0	0.991 4
模型 model	温度/°C temperature	$\alpha$	$\beta$ (s)	$X^2 \times 10^{-3}$	RSS $\times 10^{-2}$	Adj. $R^2$	
Weibull	25	0.658 5	1 418.039 3	0.164 3	0.230 0	0.995 9	
	40	0.616 4	828.814 8	0.835 2	1.190 0	0.983 9	
	60	0.567 6	426.766 7	1.460 0	2.038 0	0.977 1	
	80	0.566 0	391.206 5	2.130 0	2.976 0	0.972 5	
	100	0.527 9	190.116 7	1.600 0	2.241 0	0.981 5	

## 2.2 包装尺寸和形状对罗非鱼片微波复水特性影响

将罗非鱼片放入不同尺寸的圆形容器内,进行微波复水,复水结果如图 2-a 所示。复水开始的 250 s 内,随着复水时间的增加,鱼片的水分含量急剧增加。在 250 s 左右时鱼片的水分含量达到最大值并保持平衡。在大圆中的鱼片的复水速率最大,所能达到的平衡水分含量最高,中圆复水速率最小,所能达到的平衡水分含量最低。采用 Peleg 模型和 Weibull 模型对实验数据进行拟合,拟合结果如表 3 所示。对于 Peleg 模型来说,动力学速率常数  $k_1$  随着容器半径的增大而呈现先增大后减小的趋势。大圆中的值最小[1.379 0 s(g d. b./g)],且平衡水分含量最大(1.712 9 g/g d. b.)。对于 Weibull 模型来说,形状参数  $\alpha$  和尺寸参数  $\beta$  都随着容器半径的增大而呈现递减的趋势。相对于 Weibull 模型,Peleg 模型的 Adj.  $R^2$  值更大,且  $X^2$  值和 RSS 值都较小。

罗非鱼片在方形容器中的复水速率如图 2-b 所示,在复水开始的 300 s 内,随着复水时间的增加,鱼片的水分含量急剧增加。在 300 s 左右时达到最大值并保持平衡。对于方形容器,大方的容器中鱼片的复水速率最大,所能达到的平衡水分含量最高,小方的复水速率最小,所能达到的平衡水分含量也最低。采用 Peleg 模型和 Weibull 模型对实验数据进行拟合,拟合结果如表 3 所示。对于 Peleg 模型来说, $k_1$  (初始阶段复水速率与  $1/$

$k_1$ 成正比):小方 > 大方 > 中方,这说明在复水开始阶段的在中方容器中鱼片的复水速率最大,大方其次,小方最小; $k_2$ :小方 > 中方 > 大方,说明随着容器尺寸的增加鱼片复水所能达到的平衡水分含量增加。

## 2.3 含盐量对罗非鱼片微波复水特性的影响

罗非鱼片与含有 1% NaCl 的去离子水共同放入圆形、方形容器中复水情况如图 3 所示。随着复水的进行,鱼片的水分含量快速升高,并在 250 s 左右时达到最大值,随后保持平衡。从图 3-a 中可以看出,对于圆形容器,大尺寸的圆形容器中的样品的复水速率最大,所能达到的平衡水分含量最高,中圆复水速率最小,所能达到的平衡水分含量最低。从图 3-b 中可以看出,对于方形容器,大方的容器中鱼片的复水速率最大,所能达到的平衡水分含量最高,小方的复水速率最小,所能达到的平衡水分含量最低。与圆形相比,同样的底面积及水深度,方形所能达到的最大平衡水分含量较小。鱼片在含 1% NaCl 的去离子水中的圆形容器中和方形容器中的 Peleg 模型和 Weibull 模型的拟合情况如表 4 所示。对于 Peleg 模型, $k_1$  越小则表明初始时的复水速率越高, $k_2$  越小则表明所能达到的平衡水分含量越高。在 Weibull 模型中, $\alpha$  是形状参数, $\beta$  为尺寸参数,是吸收 63% 水分所需的时间,可以用来表征水分吸收速率,其值越小,表明水分吸收速率越高。

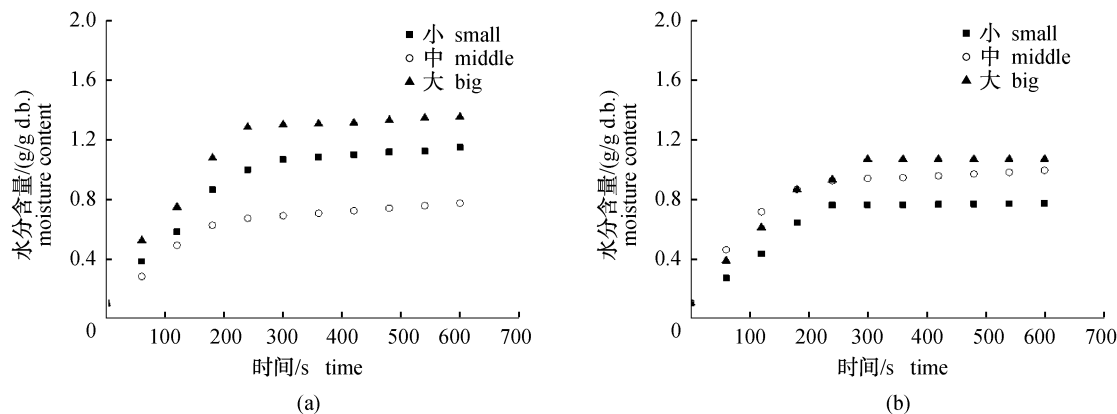


图 2 在不同尺寸的圆柱形 (a) 和方形 (b) 包装容器内罗非鱼片微波复水特性  
Fig. 2 Moisture content of tilapia fillets in cylindrical (a) and cubic (b) containers during microwave rehydration

表 3 不同容器中罗非鱼鱼片复水模型的参数及数值分析  
 Tab. 3 Estimated parameters and statistical analysis of rehydration models of dried tilapia fillets in different containers

模型 model	容器 container	大小 size	$k_1/$ [s(g d. b./g)]	$k_2/$ (g d. b./g)	$M_e/$ (g/g d. b.)	$X^2 \times 10^{-4}$	$RSS \times 10^{-2}$	Adj. $R^2$
Peleg	圆柱形 cylinder	小 small	2.083 4	0.704 5	1.419 4	3.850 0	3.464 0	0.969 7
		中 middle	2.751 4	1.187 8	0.941 9	1.110 0	0.999 0	0.976 7
		大 big	1.379 0	0.620 0	1.712 9	6.630 0	5.968 0	0.962 8
	方形 cube	小 small	2.775 6	1.104 2	1.005 7	3.850 0	3.465 0	0.933 3
		中 middle	1.363 3	0.954 7	1.1475	1.460 0	1.311 0	0.981 7
		大 big	1.929 5	0.767 1	1.403 6	4.130 0	3.716 0	0.963 6
模型 model	容器 container	大小 size	$\alpha$	$\beta$ (s)	$X^2 \times 10^{-3}$	$RSS \times 10^{-2}$	Adj. $R^2$	
Weibull	圆柱形 cylinder	小 small	0.774 0	4.352 7	4.970 0	4.477 0	0.960 8	
		中 middle	0.678 1	4.215 7	1.810 0	1.633 0	0.962 0	
		大 big	0.675 2	4.047 9	9.340 0	8.402 0	0.947 6	
	方形 cube	小 small	0.708 9	4.530 2	5.050 0	4.549 0	0.912 5	
		中 middle	0.614 0	2.629 8	2.540 0	2.289 0	0.968 1	
		大 big	0.695 8	4.537 4	5.990 0	5.392 0	0.947 3	

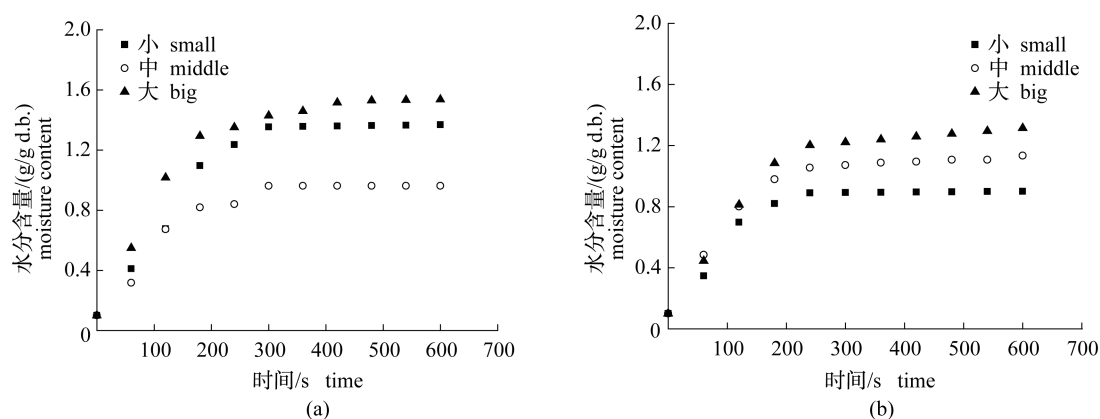


图 3 在不同尺寸的圆柱形 (a) 和方形 (b) 包装容器内罗非鱼片微波复水特性 (含 1% NaCl)

Fig. 3 Moisture content of tilapia fillets (1% NaCl) in cylindrical (a) and cubic (b) containers during microwave rehydration

表 4 不同容器中罗非鱼鱼片复水模型的参数及数值分析 (1% NaCl)  
 Tab. 4 Estimated parameters and statistical analysis of rehydration models of dried tilapia fillets in cylindrical containers (1% NaCl)

模型 model	容器 container	大小 size	$k_1/$ [s(g d. b./g)]	$k_2/$ (g d. b./g)	$M_e/$ (g/g d. b.)	$X^2 \times 10^{-4}$	$RSS \times 10^{-2}$	Adj. $R^2$
Peleg	圆柱形 cylinder	小 small	1.634 2	0.567 1	1.763 5	11.420 0	10.278 0	0.944 8
		中 middle	1.887 3	0.897 2	1.214 6	4.240 0	3.817 0	0.952 5
		大 big	1.095 2	0.556 7	1.896 4	5.180 0	4.661 0	0.977 0
	方形 cube	小 small	1.544 8	1.020 6	0.979 8	4.410 0	3.966 0	0.940 5
		中 middle	1.246 0	0.815 6	1.326 0	2.620 0	2.357 0	0.976 1
		大 big	1.393 4	0.653 9	1.629 2	5.380 0	4.846 0	0.967 0

续表 4

模型 model	容器 container	大小 size	$\alpha$	$\beta$ (s)	$X^2 \times 10^{-3}$	$RSS \times 10^{-2}$	Adj. $R^2$
Weibull	圆柱形 cylinder	小 small	0.775 5	4.403 0	14.040 0	12.640 0	0.932 1
		中 middle	0.681 7	3.849 3	6.010 0	5.412 0	0.932 6
		大 big	0.659 1	3.611 1	8.660 0	7.794 0	0.961 5
	方形 cube	小 small	0.989 8	2.104 9	3.670 0	3.307 0	0.950 4
		中 middle	0.627 5	2.818 2	4.320 0	3.885 0	0.960 5
		大 big	0.674 7	3.894 9	8.250 0	7.424 0	0.949 5

### 3 讨论

#### 3.1 复水温度对罗非鱼片复水特性的影响

复水温度越高,水分含量最大值越高,所需时间越短,此结果与 Vega-G 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。但复水后的样品水分含量没有达到样品的初始水分含量(3.859 0 g/g d. b.)。这表明,复水过程是不可逆的,干燥过程中细胞缩水和组织结构破坏导致样品的复水能力下降<sup>[25]</sup>。对于 Peleg 模型, $k_1$ (动力学速率常数)和  $k_2$ 均随着温度的升高而降低。复水速率与  $k_1$  倒数正相关。因此, $k_1$  的降低表明,随着温度的上升水分子运动加快,扩散速率增加,这与 Dalali 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。随着复水温度的增加, $k_2$  下降,这表明物料吸水能力随着温度的增加而增加。但一些研究者认为它是一个常数,不随水温的变化而变化<sup>[27]</sup>,还有一些研究者甚至发现它随温度的升高而升高<sup>[28]</sup>。而且,平衡水分含量  $M_e$  随着水分含量的增加而增加,100 °C 时  $M_e$  (1.263 2 g/g d. b.) 比 25 °C 时 (0.870 0 g/g d. b.) 高 0.452 0 倍。这与方程(2)的表述一致, $M_e$  与  $k_2$  呈负相关。Weibull 模型中,形状参数  $\alpha$  与复水开始阶段水分吸收速率相关, $\alpha$  值越低,表明开始阶段水分吸收速率越高。形状参数  $\alpha$  随着水温的升高而降低,表明在较低复水温度下,水分的吸收速率越低。尺寸参数  $\beta$  也随着温度的升高而降低,表明温度越高其水分吸收速率越高。

#### 3.2 包装尺寸和形状对罗非鱼片微波复水特性的影响

一般,复水过程由水的吸收、膨胀和水溶性物质浸出等 3 个同步过程组成<sup>[29]</sup>。在固定频率下(150 W),随着微波复水时间的增加其复水温度也增加。但其平衡水分含量随复水温度的增加而

增加或减少。因为复水温度对平衡水分含量的影响取决于样品。这与 García-Segovia 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。另外,在不同尺寸圆形容器的复水速率也并未随着圆形容器的增大而依次增大或减小,这是由于在鱼片微波复水过程中,微波照射到容器表面,经反射、折射、吸收等一系列过程,使得样品所得到的电磁能有差异,加之由此所导致的升温速率快慢不一,使得样品的复水速率有所差别。对于 Weibull 模型, $\alpha$ 、 $\beta$  均随着容器尺寸的增大而降低,表明随着容器尺寸的增大其开始阶段水分吸收速率越高。形状参数  $\alpha$  随着尺寸的升高而降低,表明在容器底面积越大,容器内的样品的水分吸收速率越高,这与罗非鱼片的实际复水情况有少许出入,说明相较于 Weibull 模型,Peleg 模型更适合对罗非鱼片的复水过程进行描述。这与 Dadali 等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。

复水是一个复杂的过程,其影响因素可分为内在因素(样品的化学组成、干燥预处理、样品组成、干燥工艺和条件等)与外在因素(浸没介质的组成、温度、流体动力学条件等)<sup>[29]</sup>。这些影响因素共同决定着复水效率和复水效果。本研究中,与圆形相比,同样的底面积与水深,方形容器中复水的鱼片所能达到的最大平衡水分含量较小,造成这种现象的主要原因可能有 2 种,一是因为在方形容器中,样品经微波加热后温度分布不均匀,在容器棱角部位,液体受到过度加热,而内部受到的加热偏少;二是因为方形容器限制了液体的流动,使内部的热量传递受到一定程度的阻碍,从而影响了液体的升温速率。

对于干制品,快速和完整的复水过程是非常重要的。因为从复水过程的快慢和复水效果中可以判断干燥和预处理过程中对样品组织的损伤程度<sup>[31]</sup>。圆形容器所能达到的最高平衡水分含量

高于普通的水浴复水。此外,微波复水约需 240 s 就可以达到平衡,而水浴复水最快(水温为 100 ℃)需 600 s 才可以达到平衡,在复水之前将水加热到 100 ℃需要至少 100 s,由此可见微波复水速率大大高于水浴复水,约比水浴复水节约 2/3 时间。

### 3.3 含盐量对罗非鱼片微波复水特性的影响

本实验发现在含有 1% NaCl 的去离子水的容器中所能达到的最高平衡水分含量高于没有加 NaCl 的去离子水的容器中所能达到的最高平衡水分含量。这是因为加入 NaCl 后,汤料的介电损失率增加,将电磁能转化为热能的能力加大,使得复水速率也随之增大。杨振超等<sup>[32]</sup>的研究表明,NaCl 含量越高,这种影响就越显著,尤其是对于尺寸大的样品,NaCl 的加入会造成中心温度低,边缘温度高的现象。

## 4 结论

随着复水时间的延长,鱼片的含水率逐渐增高,在 250 ~ 300 s 左右达到最大值并保持稳定。实验条件范围内,容积大的容器较利于微波复水( $V = 115\ 455\ \text{mm}^3$ ),相较于方形容器,圆形容器更利于罗非鱼片的微波复水。添加 NaCl 可以增大汤料的介电损失率,使其复水速率增加,复水效果更好。结果表明,微波复水较传统的水浴复水可节约约 2/3 的时间。Peleg 模型对实验数据的拟合度更高,更适合描述罗非鱼片的复水过程。实验结果可以用于缩短鱼片复水时间,提高鱼片品质,提高家庭操作的可控性,并为微波在鱼片复水的工业化中的应用提供一些依据。

### 参考文献:

- [1] 程裕东,酒井升,半泽保. 2 450 MHz 频率下含盐凝胶琼脂的介电特性[J]. 上海水产大学学报,1999,8(4):337-341.
- [2] 曹燕,程裕东. 鲢、狭鳕鱼糜微波加热凝胶形成的动力学分析[J]. 水产学报,2005,29(4):547-551.
- [3] 周颖越,程裕东. 单甘酯对微波复热食品阻水性能的研究[J]. 食品科技,2006,31(10):128-130.
- [4] 黄燕,程裕东,梁凯. 微波、热风干燥对橙皮干燥特性及其品质影响的比较[J]. 食品科学,2009,30(21):16-20.
- [5] 周旺,程裕东,张云蓉. 辣椒粉的微波干燥特性研究[J]. 食品科学,2009,30(19):65-69.
- [6] 刘娟娟,程裕东,金银哲. 红枣浆粉体化微波干燥特性研究[J]. 上海海洋大学学报,2013,22(3):458-465.
- [7] 黄敏璋,程裕东,周颖越,等. 豆浆饮料的微波杀菌特性初步研究[J]. 食品科学,2006,27(12):152-156.
- [8] 刘世雄,李卓思,程裕东. 2 450 MHz 频率微波加热条件下番茄汁杀菌特性的研究[J]. 食品科学,2008,29(9):249-253.
- [9] 李卓思,刘世雄,程裕东. 番茄汁的微波杀菌工艺研究[J]. 湖南农业科学,2010(7):104-106,109.
- [10] 李卓思,程裕东,刘世雄. 微波和巴氏杀菌后番茄汁品质动力学[J]. 农业工程学报,2010,26(7):335-340.
- [11] 李卓思,程裕东,杨晓敏,等. 含果粒液体食品微波杀菌动力学模型比较研究[J]. 上海海洋大学学报,2011,20(1):137-143.
- [12] 王伊,程裕东,金银哲. 鲢鱼糜与淀粉复合系统的微波糊化特性研究[J]. 水产学报,2012,36(7):1140-1145.
- [13] 吴素萍. 干燥方法对方便米粥复水性的影响[J]. 粮油加工与食品机械,2005,(9):74-76.
- [14] 焦爱权,庄海宁,金征宇,等. 微波热风干燥挤压方便米饭的脱水和复水数学模型的建立[J]. 食品与生物技术学报,2009,28(2):156-161.
- [15] 杨颖. 酶法浸泡及微波热风干燥对方便米饭复水时间影响的研究[J]. 食品科学,2006,27(12):498-500.
- [16] 马先英,赵世明,林艾光. 不同干燥方法对胡萝卜复水性及品质的影响[J]. 大连水产学院学报,2006,21(2):158-161.
- [17] Peleg M. A empirical model for the description of moisture sorption curves [J]. Journal of Food Science,1988,53(4),1216-1217.
- [18] Hung T V, Liu L H, Black R G, et al. Water sorption in chickpea (*C. arietinum*) and field pea (*P. sativum*) cultivars using the Peleg model [J]. Journal of Food Science,1993,58(4):848-852.
- [19] Corzo O, Bracho N. Application of Weibull distribution model to describe the vacuum pulse osmotic dehydration of sardine sheets [J]. LWT-Food Science and Technology,2008,41(6):1108-1115.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张保艳,于海洋,程裕东,等. 温度、频率和水分含量对罗非鱼介电特性的影响[J]. 水产学报,2012,

- 36(11):1785-1792.
- [23] Zhang B Y, Jin Y Z, Cheng Y D. Microwave drying of tilapia fillets; kinetics and modeling [J]. *Advanced Material Research*, 2012, 396-398:1306-1312.
- [24] Vega-G B Y, A, Notte-Cuello E, Lemus-Mondaca R, *et al.* Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2009, 87(4):254-260.
- [25] Krokida M K, Marinos-Kouris D. Rehydration kinetics of dehydrated products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 57(1):1-7.
- [26] Dalali G, Demirhan E, Özbek B. Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2008, 86(4):235-241.
- [27] Sopade P A, Kaimur K. Application of Peleg's equation in desorption studies of food systems: A case study with sago (*Metroxylon sagu Rottb.*) starch [J]. *Drying Technology*, 1999, 17(4-5):975-989.
- [28] Solomon W K. Hydration kinetics of lupin (*Lupinus Albus*) seeds [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2007, 30(1):119-130.
- [29] García-Segovia P, Andrés-Bello A, Martínez-Monzó J. Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(2):480-488.
- [30] Dadali G, Demirhan E, Özbek B. Effect of drying conditions on rehydration kinetics of microwave dried spinach [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2008, 86(4):235-241.
- [31] Tello-Irelandia C, Lemus-Mondacaa R, Vega-Gálveza A, *et al.* Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis* [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(10):2112-2118.
- [32] 杨振超,程裕东,金银哲. 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下温度和盐溶液浸渍对青鱼介电特性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(10):138-141, 158.



## Effects of packaging size and shape on the microwave rehydration characteristics of tilapia fillets

ZHANG Baoyan, YU Haiyang, CHENG Yudong\*, JIN Yinzhe\*

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

**Abstract:** In order to improve the rehydration rate and rehydration effect, the dried tilapia fillets (moisture content decreased to 0.100 0 (g/g d. b.) (dry basis)) were hydrated by microwave. Tilapia fillets were put into the container made of acrylic materials with different sizes and shapes. The effect of container shape, container size, and salt content on the microwave rehydration was investigated. The result shows that the moisture content increased gradually with the rehydration time extending, reached a maximum value and maintain stability after 250 – 300 s. The moisture content of sample after rehydration process did not reach the initial moisture content (3.859 0 (g/g d. b.)). It is shown that the rehydration process is irreversible, cell dehydration and damaged organizational structure during the drying process cause the rehydration ability of sample to decrease. In this study, the larger size of the container has a better rehydration effect. Compared with cubic container, cylindrical container is more advantageous to the microwave rehydration for Tilapia fillets. The dielectric loss rate of soup material increased with the increasing of NaCl contents, so that the rehydration rate increased. In summary, rehydration time by microwave is about 240 s, which saves about 2/3 time compared with the traditional water bath (about 700 s). Moreover, some models such as Peleg and Weibull model were used to fit the rehydration process. It was found that Peleg model has a higher fitness for the experiment data than Weibull model. Peleg model was more suitable for describing the rehydration process of tilapia fillets.

**Key words:** tilapia fillets; rehydration; microwave; Peleg model; Weibull model

**Corresponding author:** JIN Yinzhe. E-mail: yzjin@shou.edu.cn;

CHENG Yudong. E-mail: ydcheng@shou.edu.cn