

# 加热方式对鱼糜凝胶特性的影响

朱玉安<sup>1,2</sup>, 刘友明<sup>1,2,\*</sup>, 张秋亮<sup>1,2</sup>, 赵思明<sup>1,2</sup>, 熊善柏<sup>1,2</sup>

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北 武汉 430070; 2. 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 以鲢鱼糜为原料, 研究蒸制、煮制及微波加热对鱼糜凝胶品质的影响, 采用分形分析鱼糜凝胶微观结构, 并初步探讨鱼糜微观结构与鱼糜凝胶特性的相关性。结果表明: 加热方式显著影响鱼糜凝胶的硬度、咀嚼性、凝胶强度、破断强度和微观结构参数( $P \leq 0.05$ ), 对内聚性、凹陷深度、持水性有一定影响。相关性分析表明: 分形维数较大和平均当量直径较小时, 鱼糜凝胶的硬度、咀嚼性、凝胶强度、破断强度、凹陷深度和持水性都较大。  
**关键词:** 鱼糜; 凝胶; 加热方式; 加热速度; 分形; 微观结构

## Effect of Heating Methods on Gel Properties of Silver Carp Fish Surimi

ZHU Yu-an<sup>1,2</sup>, LIU You-ming<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Qiu-liang<sup>1,2</sup>, ZHAO Si-ming<sup>1,2</sup>, XIONG Shan-bai<sup>1,2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. National Research and Development Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The effects of different heating methods such as steaming, hot-water heating and microwave heating on gel properties of silver carp surimi were investigated in this paper. Using fractal analysis, the correlation between fish surimi gel characteristics and microstructure was also explored. The results showed that: (1) heating methods had a significant effect on microstructure and texture of fish surimi ( $P \leq 0.05$ ) and microwave heating could provide more uniform and compact structure; (2) heating methods had a significant effect on fractal dimension and pore diameter ( $P \leq 0.05$ ), and the fractal dimension for silver carp surimi was determined to be 2.7—2.9 and the average pore diameter ranges from 0.1 to 0.3  $\mu\text{m}$ ; (3) larger fractal dimension and smaller pore equivalent diameter could provide higher hardness, chewiness, gel strength, breaking force, deformation and water retention. Therefore, fractal dimension and pore equivalent diameter can well reflect the microstructure of surimi.

**Key words:** surimi; gel; heating methods; heating rate; fractal; microstructure

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)23-0107-04

加热是鱼糜类制品加工的重要环节之一, 主要加热方式有水浴加热<sup>[1]</sup>、蒸汽加热<sup>[1]</sup>、欧姆加热<sup>[2-3]</sup>和微波加热<sup>[4]</sup>。传统的水浴加热和蒸汽加热热量由外部向内部传递, 加热速度慢、物料温度梯度大及加热时间长易引起凝胶劣化而导致鱼糜制品品质下降。欧姆加热由于对样品要求高, 不能实现过程连续化等缺点而尚未在工业化生产得到普及。微波加热特点使之在鱼糜类制品加工中具有巨大的吸引力, 微波能够深入到物料内部使物料整体同时加热, 不需要从外到内的热传导过程, 具有加热速度快, 所需时间短、加热均匀、热转换效率高、节能以及易于控制等显著优点<sup>[5]</sup>。早在 20 世纪 80 年代就曾报道了微波加热鱼糜制品的效率和经济效益<sup>[6]</sup>, 人们主要对微波加热与传统加热方式下制得的鱼糜凝胶的质构特性和微观结构进行研究<sup>[7-8]</sup>, 但是对鱼糜凝胶特性与

微观结构和加热速度的关系研究相对较少。

凝胶特性是评价鱼糜凝胶品质的重要参数之一, 与微观结构密切相关<sup>[9]</sup>。在鱼糜加热形成凝胶过程中, 蛋白质分子链展开, 疏水性基团暴露, 同时维系鱼糜蛋白质构象和作用力发生变化, 分子间相互作用、团聚形成聚集体<sup>[10-11]</sup>, 聚集体的大小、分布及形状构成了鱼糜凝胶的微观结构, 与热诱导方式、时间、温度等有关<sup>[12]</sup>。研究加热方式对鱼糜凝胶特性的影响, 结合微观结构分析, 有助于选择合理加热方式来生产出品质优良的鱼糜凝胶制品。

本实验比较了蒸制、煮制、微波加热鱼糜凝胶的加热速度、鱼糜凝胶特性和持水性, 应用数值图像处理技术与分形原理, 定量分析了 3 种加热方式下鱼糜凝胶的微观结构, 与鱼糜的凝胶特性等建立了一定的相关

收稿日期: 2011-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000797); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-46-23)

作者简介: 朱玉安(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工及贮藏。E-mail: zyayhy@163.com

\* 通信作者: 刘友明(1975—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为水产品加工及贮藏。E-mail: lym@mail.hzau.edu.cn

性,为鱼糜凝胶的微观结构定量分析提供参考,对微波应用于鱼糜制品的加工有着积极的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

白鲢,购于华中农业大学农贸市场。

NaCl、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、CuSO<sub>4</sub>等均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

TA-XTPlus 型质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;JSM-6390 型扫描电子显微镜 日本 NTC 公司;HH-4 型恒温水浴锅 国华电器有限公司;FJ-200 型高速分散均质机 上海标本模型厂;WS2L-1 型实验微波炉 南京三乐高新科技工程公司微波所。

### 1.3 凝胶的制备及凝胶中心温度的测定

新鲜鲢鱼用自来水清洗后去头、去鳞、去内脏,采得的鱼肉用 5 倍体积的自来水漂洗 2 次,再用 5 倍体积 0.5% NaCl 溶液漂洗 1 次,将漂洗后的鱼肉沥干、斩拌、擂溃,灌入肠衣,并用卡口机将两端密封。采用两段加热法,第一段在 40℃ 条件下加热 1h,第二段分别在 480W 微波条件下加热 3min,90℃ 水浴中 20min,沸水蒸制 10min,胶凝过程中把数字巡回测温仪的探头插入凝胶中心测定凝胶中心的温度,微波加热采用间隔取样来测定鱼糜凝胶中心温度,将制得的鱼糜凝胶迅速用流水冷却后置于 4℃ 条件下冷藏。

### 1.4 鱼糜凝胶微观结构的观察

将制备的样品切成宽 3~4mm、厚 1mm 的小块,先用 2.5% 戊二醛进行固定,置于 4℃ 冰箱隔夜放置;然后用 1% 的锇酸固定 2h;再用磷酸缓冲液(pH7.0)清洗 3 遍;最后用 10% 二甲基亚砜(DMSO)浸透 6h;将处理好的样品置于冷冻干燥机中冻干后对样品进行喷金处理以备扫描电镜观察。

### 1.5 TPA 及凝胶强度的测定

在室温条件下用 TA-XTPlus 质构分析仪进行 TPA 测定,测定硬度、弹性、内聚性、咀嚼性指标,将鱼糜凝胶切成 20mm 长的圆柱体,采用型号为 P/36R 探头对样品进行两次压缩,测前速度为 2mm/s,测试速度和测后速度均为 1mm/s,压缩百分比为 50%,停留时间 5s;采用型号为 P/0.25S 探头对样品进行一次压缩,压缩距离为 15mm,测试过程中第一个峰的最大力即为破断强度,对应的压缩距离为凹陷深度,凝胶强度等于破断强度与凹陷深度的乘积。

每组实验重复 5 次,实验结果为 5 次实验结果的平均值。

### 1.6 持水性能的测定

将鱼糜凝胶纵向切成 5mm 厚片状,称其质量  $m_1$ ,取长条滤纸将其裹住,用 5kg 的力压此鱼糜凝胶 2min,后将鱼糜凝胶称质量  $m_2$ 。持水性按式(1)计算。

$$\text{持水性}/\% = (1 - \frac{m_1 - m_2}{m_1}) \times 100 \quad (1)$$

每组实验重复 5 次,实验结果为 5 次实验结果的平均值。

### 1.7 扫描电镜图片处理

本实验采用公共软件 ImageJ 1.42q 及其插件 FracLac-2.5 Release 1 d,按照参考文献[13-14]的方法对扫描电镜图片进行二值化处理。

#### 1.7.1 分形维数的定义及计算

分形维数  $D_f$  采用计盒维数的方法确定<sup>[14]</sup>,其基本原理为:将扫描电镜图二值化后,数值图像的像素矩阵元素值均为 1 或 0,对已二值化的扫描电镜图像划分为边长是  $\delta_k$  的网格,然后计算出覆盖图像含有像素值为 1 的网格数目  $N_{\delta_k}$ 。根据式(1),当  $\delta_k \rightarrow 0$  时,  $\ln N_{\delta_k} / \ln(1/\delta_k) \rightarrow D_B$ ,据此可求出盒维数  $D_B$ 。因此对于某递减序  $\delta_k$ ,可以在双对数坐标系中拟合数据点  $(-\ln \delta_k, \ln N_{\delta_k})$ ,其斜率即为此扫描电镜图片的盒维数  $D_B$ 。本实验采用图像处理软件 ImageJ 1.42q 中 FracLac-2.5 Release 1d 插件计算盒维数,盒维数  $D_B$  是基于二维数值图像获得的分形参数,分形维数  $D_f$  是在盒维数  $D_B$  上增加一维,代表三维蛋白质凝胶的分形特征<sup>[14]</sup>。

$$D_B = \lim_{\delta_k \rightarrow 0} \ln N_{\delta_k} / (-\ln \delta_k) \quad (2)$$

$$D_f = D_B + 1 \quad (3)$$

式中:  $\delta_k$  为尺度;  $N_{\delta_k}$  为一定尺度下含有像素值为 1 的网格数;  $D_B$  为盒维数;  $D_f$  为分形维数。

#### 1.7.2 平均孔隙当量直径的计算

孔隙的平均当量直径可以反映鱼糜微结构中孔隙的大小,孔隙大小可以在一定程度上描述凝胶体的微观结构<sup>[12]</sup>。利用 ImageJ 1.42q 软件对扫描电镜下的凝胶孔隙进行统计,不规则的孔隙大小可用当量直径来表示,并采用如下方法计算平均孔隙当量直径,其计算方法见式(4)、(5)。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (4)$$

$$A = \frac{S \times k}{n} \quad (5)$$

式中:  $A$  为孔隙平均面积;  $d$  为平均孔隙当量直径/ $\mu\text{m}$ ;  $S$  为图片面积;  $n$  为孔隙数目;  $k$  为孔隙累积面积百分比。

### 1.8 数据处理

所有实验数据采用 SAS9.0 统计软件进行方差分析,采用 Duncan's 多重比较对数据之间的差异显著性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同加热方式下凝胶过程中鱼糜中心温度的变化

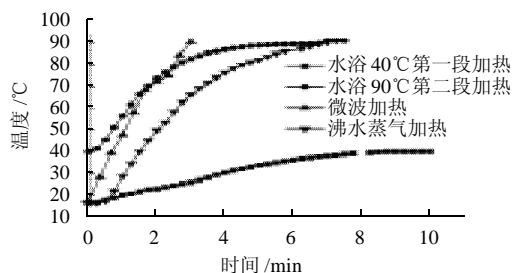
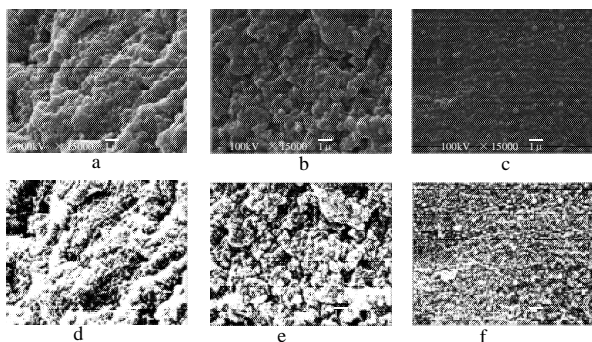


图1 凝胶过程鱼糜中心温度变化曲线

Fig. 1 Change curves of center temperature during heat-induced gel formation

由图1可见,微波加热凝胶化时,时间3min时鱼糜凝胶中心温度由16.4℃上升到90.4℃,平均升温速率为22.4℃/min,鱼糜中心温度符合方程 $y = -0.0007x^2 + 0.53x + 18.76 (R^2 = 0.995)$ ;由起始温度 $(16.8 \pm 1)^\circ\text{C}$ 上升到 $(90.3 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,两段水浴加热法需要22min,蒸汽加热需要7min,平均升温速率分别为3.2℃/min和10.3℃/min,鱼糜中心温度分别符合方程 $y = -0.41x^2 + 9.11x + 40.43 (R^2 = 0.978)$ (第二段水浴)和 $y = -0.0003x^2 + 0.32x + 19.49 (R^2 = 0.985)$ 。由上可以算得,微波平均加热速度大约是水浴加热速度的7倍,大约是蒸汽加热速度的2倍。

## 2.2 加热方式对鱼糜凝胶微观结构的影响

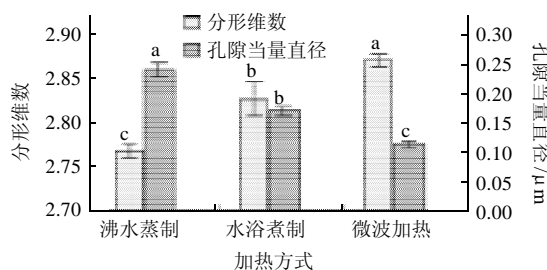


a、b、c分别为沸水蒸制、水浴煮制、微波加热下的鱼糜凝胶的扫描电镜图; d、e、f为沸水蒸制、水浴煮制、微波加热下的鱼糜凝胶对应的二值化图。

图2 鲢鱼糜凝胶扫描电镜图

Fig.2 Scanning electron microscopic images of silver carp surimi gels

如图2所示, a、b、c为不同加热方式下鱼糜凝胶的扫描电镜图片, d、e、f为其对应的二值化图, 微观结构参数如图3所示。

同一系列字母不同表示有显著性差异( $P \leq 0.05$ )图3 加热方式对鲢鱼糜凝胶分形维数和孔径的影响( $n = 3$ )Fig.3 Effect of heating methods on fractal dimension and pore size of silver carp surimi( $n = 3$ )

分形维数反映了体系复杂程度,当体系越复杂时,分形维数也越大,表明曲线的复杂度越大,越趋于填满一定范围内的平面<sup>[15]</sup>。对鱼糜凝胶体来说,当分形维数越高时,凝胶聚集体细碎、紧凑、致密地分布于鱼糜凝胶体中。图3表明,微波加热的鱼糜凝胶分形维数最大,平均孔隙当量直径最小;沸水蒸制的鱼糜凝胶分形维数最小,平均孔隙当量直径最大;水浴煮制的鱼糜凝胶分形维数和平均孔隙当量直径介于微波加热和沸水蒸制之间。方差分析表明,不同加热方式下的鱼糜凝胶的分形维数和平均孔隙当量直径有显著差异( $P \leq 0.05$ )。

## 2.3 加热方式对鱼糜凝胶质构和持水性的影响

由表1可知,3种加热方式的鱼糜凝胶的质构特性(除弹性外)和持水性有差异( $P \leq 0.05$ ),微波加热下的鱼糜凝胶硬度、咀嚼性、凝胶强度、破断强度、凹陷深度和持水性最大,其次是煮制,蒸制的最小,而弹性和内聚性则相反。微波加热与水浴煮制下鱼糜凝胶的持水性并没有显著差异,可能是水浴煮制下的鱼糜凝胶已形成连续但粗糙的网络结构(图2),有利于保持住水分,也有可能和持水性测定方法选择有关。Bhattacharya等<sup>[16]</sup>在研究微波加热法制作大豆蛋白凝胶时,也发现大豆蛋白分子在微波高强度加热后展开体积变大,认为是由于微波加热强度比水浴和蒸汽加热强度高。

## 2.4 鱼糜微观结构与其质构特性相关性分析

由表2可知,鱼糜硬度、持水性、凝胶强度、破断强度、凹陷深度与分形维数呈极显著正相关,咀嚼性与分形维数呈显著正相关( $P \leq 0.01$ );鱼糜硬度、持水性、凝胶强度、破断强度、凹陷深度与孔径大小呈极显

表1 加热方式对鲢鱼糜凝胶的质构参数和持水性的影响( $n = 3$ )Table 1 Effect of heating methods on TPA parameters and water-holding capacity of silver carp surimi gels( $n = 3$ )

加热方式	硬度/kg	弹性	内聚性	咀嚼性/kg	凝胶强度/(kg·mm)	破断强度/kg	凹陷深度/mm	持水性
沸水蒸制	$1.41 \pm 0.14^c$	$0.91 \pm 0.03^a$	$0.70 \pm 0.07^a$	$0.89 \pm 0.02^c$	$0.82 \pm 0.16^c$	$0.14 \pm 0.02^c$	$5.61 \pm 0.48^b$	$0.79 \pm 0.02^b$
水浴煮制	$1.67 \pm 0.07^b$	$0.90 \pm 0.02^a$	$0.63 \pm 0.02^a$	$0.95 \pm 0.03^b$	$2.29 \pm 0.65^b$	$0.26 \pm 0.04^b$	$8.69 \pm 2.36^a$	$0.91 \pm 0.01^a$
微波加热	$2.39 \pm 0.08^a$	$0.89 \pm 0.00^a$	$0.62 \pm 0.13^b$	$1.33 \pm 0.30^a$	$3.97 \pm 0.93^a$	$0.36 \pm 0.06^a$	$11.01 \pm 0.85^a$	$0.93 \pm 0.01^a$

注: 同列字母不同表示有显著性差异( $P \leq 0.05$ ); 鱼糜凝胶第一段采用40℃凝胶化处理1h, 第二段加热分别采用沸水蒸制(100℃, 10min), 水浴煮制(90℃, 20min), 微波加热方式(480W, 3min)。

表2 鲢鱼糜微观结构与质构特性相关性分析

Table 2 Correlation analysis between silver carp microstructure and texture properties

参数		硬度	弹性	内聚性	咀嚼性	凝胶强度	破断强度	凹陷深度	持水性
分形维数	$\gamma$	0.875**	-0.195	-0.417	0.671*	0.900**	0.950**	0.812**	0.902**
	$\alpha$	0.002	0.615	0.264	0.048	0.000	0.000	0.008	0.000
当量直径	$\gamma$	-0.903**	0.349	0.355	-0.737*	-0.857**	-0.863**	-0.837**	-0.899**
	$\alpha$	0.001	0.357	0.348	0.024	0.003	0.003	0.005	0.001

注: \*\*.差异极显著( $\alpha \leq 0.01$ ); \*.差异显著( $0.01 < \alpha \leq 0.05$ )。

著负相关,咀嚼性与孔径大小呈显著负相关( $P \leq 0.05$ )。凝胶体的质构特性和持水性与聚集体网状结构中孔隙的大小密切相关,平均孔隙当量直径越小,鱼糜聚集体越致密,硬度和持水性就越好。上述规律与血浆蛋白凝胶和牛血清蛋白凝胶一致<sup>[13-14]</sup>。

### 3 讨 论

研究表明,加热速度影响蛋白质凝胶的形成及其质构品质,较小的加热速度使蛋白质获得更长的变性、折叠、聚集时间,蛋白质网络交联结构在较低的温度开始形成,降低了凝胶化温度,有利于形成更致密有序的蛋白质三维网络结构<sup>[17-18]</sup>。而Sun等<sup>[18]</sup>在研究加热速度对豌豆蛋白凝胶特性的影响时发现,适当提高加热速度,增加了豌豆蛋白凝胶的弹性模量 $G'$ ,降低了损耗角正切 $\tan\delta$ ,形成了更好的蛋白质凝胶网络结构。本实验研究的3种加热方式,微波加热具有较高的加热速度,制得鱼糜凝胶品质优于蒸制和煮制的,这与鱼糜凝胶形成机理有关,可能是由于鱼糜加热形成凝胶过程中,较高的加热速度能保证鱼糜快速通过凝胶劣化温度段( $50 \sim 60^\circ\text{C}$ ),减弱了内源的热稳定组织蛋白酶对肌球蛋白重链的降解所引起的凝胶劣化现象<sup>[19]</sup>;同时微波在加热过程中还存在非热效应<sup>[20]</sup>,也有可能是内源的热稳定组织蛋白酶和鱼糜蛋白受微波的非热效应使其活性降低,其具体原因有待进一步研究。微波加热制得的鱼糜凝胶微观结构紧凑、致密,孔隙小且分布均匀,本实验应用了分形维数和平均孔隙当量直径来量化鱼糜凝胶的微观结构特征,与鱼糜凝胶特性建立了一定的相关性,为工程分析提供新的手段,同时也加深了微观结构对鱼糜凝胶力学特性影响的理解,在微观结构上论证微波加热鱼糜制品的优越性。能否通过对食品物料微观结构的分析和测量来建立微观力学模型来预测食品物料的力学特性,值得进一步研究。

### 4 结 论

3种加热方式下,微波加热制得的鱼糜凝胶具有良好的凝胶网络结构,更好的凝胶强度、持水性和咀嚼性等;微观结构分析,加热方式对鱼糜的微观结构参数有显著影响,其中微波制得的鱼糜凝胶具有较大的分形维数和较少的孔隙当量直径;相关性分析显示,鱼糜凝胶微观结构参数与凝胶强度、持水性等具有良好的相关性,结合微观结构分析更有助于研究控制鱼糜凝胶特性的因素。

### 参考文献:

- [1] 福田裕,陈舜胜,程裕东,等.淡水鱼冷冻鱼糜的开发[C]//中日合作淡水渔业资源加工利用技术报告文集.上海:渔业现代化,1999:87-94.
- [2] ZHOU L P, UEMURA K, FUKUDA Y, et al. Study on gel formation of Alaska pollack frozen surimi by ohmic heating[R]//Development of Technology for Utilization and Processing of Freshwater Fisheries Resources. Japan: Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) Working Report, 2001, 20: 139-145.
- [3] YONGSAWATDIGUL J, PARK J W, KOLBE E, et al. Ohmic heating maximizes gel functionality of pacific whiting surimi[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(1): 10-14.
- [4] 曹燕,程裕东.鲢、鳙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.
- [5] 严梅荣,顾华孝,马云,等.微波加热稳定米糠研究[J].中国粮油学报,2002,17(4):28-31.
- [6] YAMAGUCHI Z. About the microwave heating equipment for kamaboko[J]. New Food Ind, 1982, 24: 1-5.
- [7] 付湘晋,许时婴,王璋.微波加热法制备白鲢鱼低盐鱼糜凝胶[J].中国食品学报,2010,10(3):52-56.
- [8] GROPPER M O, RAMON I J, KOPELMAN S, et al. Effects of microwave reheating on surimi gel texture[J]. Food Research International, 1997, 30(10): 761-768.
- [9] AGUILERA J M. Why food microstructure[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67: 3-11.
- [10] FERRY J. Protein gels[J]. Adv Protein Chem, 1948, 4(1): 1.
- [11] 刘海梅,熊善柏,谢笔钧,等.鲢鱼糜凝胶形成过程中化学作用力及蛋白质构象的变化[J].中国水产科学,2008,15(3):469-475.
- [12] 柴春祥,赵杰文,邱白晶.鱼糜微结构的几何描述及分析[J].江苏理工大学学报:自然科学版,1999,20(5):8-11.
- [13] DÀVILA E, PARÉS D. Structure of heat-induced plasma protein gels studied by fractal and lacunarity analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(2): 147-153.
- [14] HAGIWARA T, KUMAGAI H, NAKAMURA K. Fractal analysis of aggregates in heat-induced BSA gels[J]. Food Hydrocolloids, 1998, 12(1): 29-36.
- [15] 倪静安.分形理论及其在食品科学领域中的应用[J].食品与生物技术,2004,23(2):104-110.
- [16] BHATTACHARYA S, JENA R. Gelling behavior of defatted soybean flour dispersions due to microwave treatment: texture, oscillatory, microstructural and sensory properties[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78: 130-1314.
- [17] COFRADES S, COLMENERO F J. Protein molecular interactions involved in the formation of frankfurters: effect of fat level and heating rate[J]. Meat Science, 1998, 49(4): 411-423.
- [18] SUN X D, ARNTFIELD S D. Gelation properties of salt-extracted pea protein isolate induced by heat treatment: effect of heating and cooling rate[J]. Food Chemistry, 2010, 124: 1011-1016.
- [19] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, TUEKSUBAN J, et al. Effect of some protein additives on proteolysis and gel-forming ability of lizardfish (*Saurida tumbil*) [J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(3): 395-401.
- [20] VARDAXIS N J, HOOGEVEEN M M, BOON M E, et al. Sporidical activity of chemical and physical tissue fixation methods[J]. British Medical Journal, 1997, 50(5): 429-433.