

水煮鱼微波烹饪过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响

Effects of moisture and tissue changes on tenderness of boiled fish during microwave cooking

陈佳奇¹ 刘天毅² 贾逾泽² 夏书芹¹

CHEN Jia-qi¹ LIU Tian-yi² JIA Yu-ze² XIA Shu-qin¹

张晓鸣¹ 王兴伟¹ 汪雪娇¹

ZHANG Xiao-ming¹ WANG Xing-wei¹ WANG Xue-jiao¹

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 广东美的厨房电器制造有限公司, 广东 佛山 528311)

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Guangzhou Midea Kitchen Appliances Manufacturing Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528311, China)

摘要:采用物性分析方法表征鱼肉的剪切力,借助低场核磁共振等手段从水分状态、蛋白质变性和微观结构等角度探索水煮鱼微波烹饪过程中鱼肉嫩度变化的原因。结果表明,微波加热初期(150 s),鱼肉中结缔组织迅速破裂,肌浆蛋白几乎完全变性,部分结合水转化为不易流动水,赋予鱼肉特有的嫩度;加热中期(300 s),鱼肉嫩度达最大值,且与传统水煮法相近。加热时间过长(390 s)可能会导致鱼肉肌肉组织发生断裂收缩、重新联结、口感变硬。因此,微波一步法烹饪水煮鱼模式设计时可适当缩短微波处理时间,有利于维持水的结合状态以及组织完整性,从而保证鱼肉的嫩度。

关键词: 鱼肉;嫩度;不易流动水;蛋白变性;微观结构

Abstract: In order to explore the causes of fish tenderness changes during microwave cooking of boiled fish, the physical property analysis method can be used to characterize the maximum shear force of fish meat, and it can also be analyzed from the perspectives of water state, protein denaturation and microstructure by method of measurement like Low field nuclear magnetic resonance(LF-NMR). The results showed that at the first stage of microwave heating (150 s), the connective tissue in fish meat was rapidly broken, and the sarcoplasmic protein was almost denatured completely. Part of the bound water was converted into

immobilized water, which gave the fish its unique tenderness. At the second stage of heating period (300 s), fish meat tenderness reaches its maximum and is similar to that of traditional cooking. Excessive heating time (390 s) may result in rupture, contraction, reconnection, and stiffening of fish meat muscle. Therefore, the design of one-step microwave method for cooking fish can shorten the time of microwave treatment, which is conducive to maintaining the combination state of water and the integrity of tissues, so as to ensure the tenderness of fish.

Keywords: fish; tenderness; immobilized water; protein denaturation; microstructure

水煮鱼是中国传统菜肴,以其香辣的风味和嫩滑的口感成为川菜的代表菜品之一。传统水煮鱼制作工艺繁琐,需分步烹饪多种食材、严格控制烹饪时间和温度。相比于传统热传导加热,微波加热具有快速高效的特点,通过调控微波程序可以将鱼片直接置于油相中达到一步烹饪的效果,从而更好地满足快捷生活的需要。然而,以油相为介质进行微波烹饪时往往会造成鱼肉质构老化,影响消费体验。嫩度是评价肉类品质的重要指标^[1],也是微波烹饪鱼肉制品面临的技术瓶颈。因此,明确微波一步法烹饪过程中鱼肉嫩度的变化规律,对微波参数的定向调控具有重要指导意义。

微波烹饪过程中,鱼肉特有质构的形成与水分状态和蛋白质变化有关。肌肉组织的变化会影响水分的存在状态,进而影响肉的嫩度^[2],而不易流动水比例会随温度的升高而增加,使肉的嫩度有所提升^[3]。烹饪过程中鱼

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFD0400105)

作者简介:陈佳奇,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:夏书芹(1979—),女,江南大学教授,博士生导师,博士。E-mail: sqxia@jiangnan.edu

收稿日期:2020-03-09

肉蛋白质组织结构的变性、收缩、凝胶化和聚集会导致肌肉收缩,析出水分^[4],使得鱼肉质构发生变化,从而影响嫩度。研究^[5]表明,加热温度越高,肌肉组织密度越大,嫩度越低。目前,有关不同种类鱼在微波环境下经水煮、蒸制、干燥等处理后嫩度的变化及原因的研究较多^[6],而有关以油相为介质进行微波烹饪过程中鱼肉嫩度的变化及影响因素的研究尚未见报道。试验拟基于微波一步法烹饪水煮鱼体系,分析微波处理过程中鱼肉嫩度的变化,探索水分存在状态和蛋白质变性程度与鱼肉嫩度变化的关系,并从微观结构的角度进一步揭示肌肉结构的变化及其对嫩度的影响,为后续微波烹饪鱼肉制品参数的调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

黑鱼:市售;

大豆油:益海嘉里金龙鱼食品股份有限公司;

新鲜黄豆芽、干制红辣椒、青花椒、大葱、生姜、大蒜、红薯淀粉、食盐、料酒、绵白糖:市售;

异硫氰酸荧光素(FITC)、尼罗红:分析纯,国药集团化学试剂(上海)有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

智能微波炉:2450 MHz 商用 X7-321D 型,美的厨房电器制造有限公司;

物性分析仪:XT PLUS/50 型,英国 SMS 公司;

低场核磁共振成像分析仪:PQ 001 型,上海纽迈电子科技有限公司;

倒置荧光显微镜:Axio Vert A1 型,德国 Oberkochen 公司;

冰冻切片机:CM1950 型,德国 Leica 公司;

差示扫描量热仪:DSC3 型,瑞士 Mettler Toledo 公司。

1.2 方法

1.2.1 原材料处理 选取大小约 80 mm×80 mm×5 mm 的新鲜无骨黑鱼片 150 g,清洗表面血污,使用腌料(食盐 2 g、绵白糖 1 g、料酒 5 g、大豆油 5 g、生姜 1 g、大蒜 1 g)腌制 1 h 备用。称取大豆油 250 g、干红辣椒 20 g、干青花椒 5 g 及其他调味料若干,与腌制好的鱼肉于陶瓷碗中充分混合,再与 50 g 黄豆芽一同放入陶瓷碗中,覆盖有孔保鲜膜,在微波炉中按照设计的加热程序进行加工,加工总时长 390 s,分别选取 S_0 (0 s)、 S_1 (150 s)、 S_2 (300 s) 和 S_3 (390 s) 为检测点。加工完成后,挑选完整的肉片备用。以传统水煮鱼样品作为对照组(CT),具体操作为:300 g 沸水中依次加热豆芽和腌制好的鱼肉(豆芽 2 min,鱼肉 1.5 min),捞出备用,采用电磁炉小火煎炸辣椒油,再

将辣椒油与豆芽和鱼肉混合。

1.2.2 最大剪切力的测定 选取 10 片厚度 5 mm 的鱼肉片,去除表面油脂及配料,切成 20 mm×20 mm×5 mm。使用 HDP/BSK 刀型探头,垂直于纤维方向切割,测前、测中速度 2.00 mm/s,测后速度 10.00 mm/s,触发力 5.0 g,剪切深度 20 mm,平行检测 8 次。最大剪切力通过模拟牙齿的切断动作来评价鱼肉的嫩度,最大剪切力越大,则鱼肉嫩度越低。

1.2.3 低场核磁共振(LF-NMR)分析水分 根据文献^[7]的方法并进行调整。选取完整的肉片,去除表面油脂及配料,修整至肉片质量为 6 g。利用 CPMG 脉冲序列测定不同烹饪时间点鱼肉样品的自旋—自旋弛豫时间(T_2)。等待时间 3 500 ms,累加次数 16,回波时间 0.25 ms,回波次数 4 000,利用 Fit 软件迭代反演拟合出 T_2 值分布及弛豫积分面积,根据各时间下的质子密度计算相应水所占的比例。

1.2.4 鱼肉微结构状态分析 根据文献^[8]的方法并进行调整。选取完整的肉片,去除表面油脂及配料,切成 5 mm×5 mm×5 mm 的小块放置于样品盘中,包裹冷冻液,−20 ℃下预冻结实后进行冷冻切片。使用尼罗红(激发波长 543 nm,散发波长 575 nm)和 0.1% FITC 溶液(激发波长 490~495 nm,散发波长 520~530 nm)分别对脂肪和蛋白质进行染色,倒置荧光显微镜下进行观察。

1.2.5 蛋白质变性程度分析 精确称取 5 mg 鱼肉样品于 DSC 坩埚中,压盖密封,以空坩埚作为对比,10 ℃恒温 1 min,以 10 ℃/min 升温至 90 ℃。

1.2.6 数据处理 同一样品至少平行 3 次,结果以“平均值±标准差”表示。使用 Excel 2016 软件处理数据并绘制表格,Origin 9.1 软件绘图,SPSS 19 软件分析标准差和相关性。

2 结果与讨论

2.1 鱼肉质构的变化

由图 1 可知,微波加热 150 s 后,鱼肉的 maximum 剪切力大幅下降,嫩度增加,与微波快速升温至 80 ℃导致的鱼肉蛋白质基本变性密切相关^[9];当加热时间为 300 s 时,由于该阶段微波功率降低,温度缓慢升至 100 ℃,肌肉蛋白的溶解、变性以及鱼肉组织的破坏使鱼肉的嫩度略有提升;当加热时间为 300~390 s 时,在较高功率下,体系温度维持在 100 ℃附近,蛋白质之间重新缔合、聚集,鱼肉质地逐渐紧密,最大剪切力增加,嫩度下降^[9],与 You 等^[10]的研究结果相似。CT 的嫩度略高于微波法的,可能是传统水煮鱼采用的工艺是在最后阶段与预制的辣椒油混合,鱼肉和辣椒油接触时间短;而微波法直接以油相作为加热介质对鱼肉进行处理,鱼肉中的水分更易向外迁移造成损失,鱼肉组织结构收缩,水分含量降低^[11]。

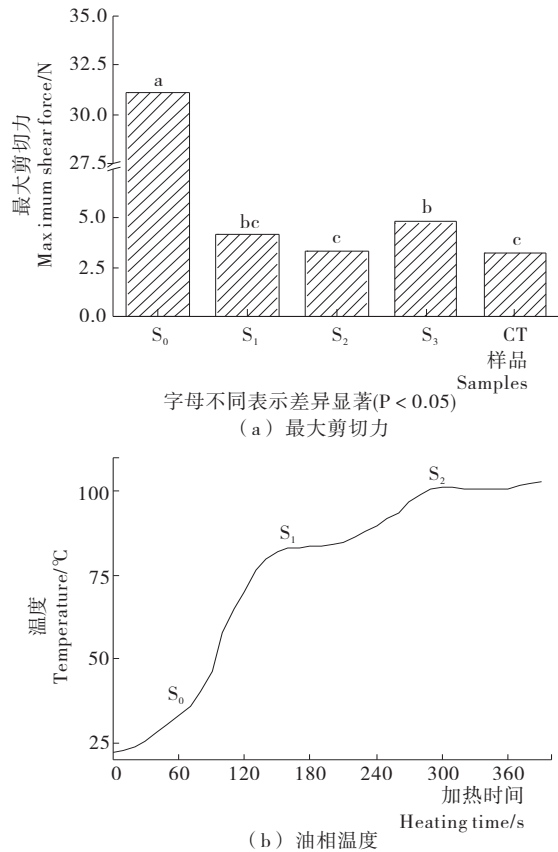


图 1 微波加热过程中鱼肉最大剪切力以及油相温度的变化

Figure 1 The maximum shear force of fish meat and the temperature curve of oil phase during microwave heating

表 1 鱼肉 LF-NMR 参数变化[†]

Table 1 The change of fish meat LF-NMR parameters ($n=3$)

样品	结合水			不易流动水			自由水		
	T_{2B}/ms	A_{2B}	$P_{2B}/\%$	T_{21}/ms	A_{21}	$P_{21}/\%$	T_{22}/ms	A_{22}	$P_{22}/\%$
S ₀	0.46±2.50	52.71±8.29 ^a	4.93±0.79 ^a	83.10±6.22 ^a	1 017.29±12.69 ^a	95.07±0.83	—	—	—
S ₁	0.30±0.90	23.64±1.28 ^b	2.20±0.13 ^b	47.69±1.85 ^b	1 034.12±6.23 ^a	96.25±1.18	310.79±7.62	16.61±1.89	1.54±0.34
S ₂	0.26±1.75	40.63±10.74 ^b	3.82±1.01 ^b	41.50±2.36 ^{bc}	1 022.79±28.99 ^a	96.18±1.47	—	—	—
S ₃	0.74±0.27	32.96±4.45 ^b	3.26±0.42 ^b	38.72±1.50 ^c	976.24±10.59 ^b	96.73±1.16	—	—	—
CT	1.29±0.75	22.94±4.20 ^b	2.16±0.44 ^b	38.72±2.69 ^c	1 040.08±19.80 ^a	97.84±0.44	—	—	—

[†] 同列字母不同表示差异显著(P<0.05);T 为弛豫时间,A 为峰面积,P 为峰面积比。

量最高,且弛豫时间较短,表明其鱼肉组织持水力强,嫩度略高。

2.3 鱼肉蛋白质变性程度分析

由图 3 可知,微波加热初期(S₁),体系温度已快速上升至 80 ℃,3 种肌肉蛋白质发生明显变性,峰面积明显下降,鱼肉组织中蛋白质降解,鱼肉嫩度上升;微波加热中后期(S₂、S₃),鱼肉中蛋白质变性程度无明显变化;CT 的

2.2 鱼肉水分状态的变化

由图 2 可知,加热初期(S₁)和中期(S₂),鱼肉中各状态水分的弛豫时间不断缩短,T₂₁峰左移,表示不易流动水的结合能力加强,鱼肉嫩度提升。Li 等^[12]研究发现,随着温度的提升和时间的延长,肉中不易流动水含量减少,嫩度下降。

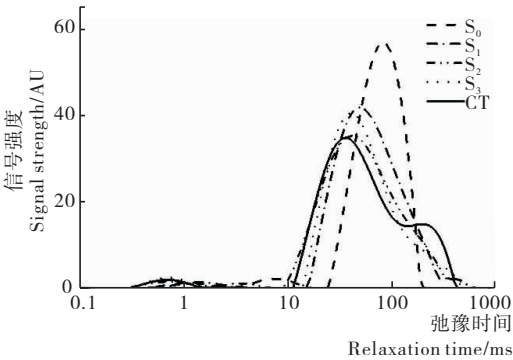


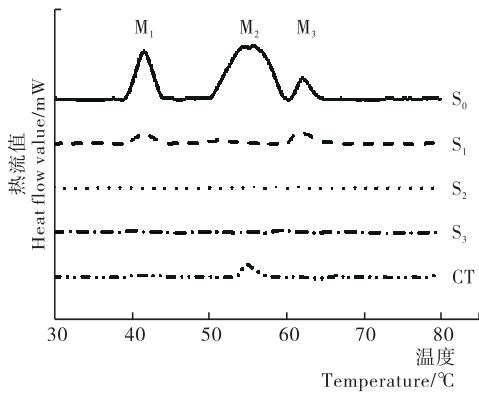
图 2 鱼肉弛豫时间(T₂)谱图

Figure 2 The relaxation time (T₂) spectra of fish meat

由表 1 可知,生鱼肉中结合水含量相对较高,是由于鱼肉结构完整,保持了大量的水分;微波加热初期(S₁),结缔组织被破坏,蛋白质开始溶解,水分结合能力下降,部分结合水转化为不易流动水,同时部分不易流动水转化为自由水而流失^[13]。温度上升使得蛋白质变性程度加剧,结合水和不易流动水含量降低,同时伴随着汁液流失^[14]。加热后期(S₃)温度较高,组织缝隙中的不易流动水不断损失,肌束膜消失,形成蛋白质凝胶网络结构,肌肉组织收缩变硬,嫩度下降^[15]。CT 中的不易流动水含

鱼肉肌浆蛋白的变性程度明显低于微波一步法。

由表 2 可知,微波加热初期(S₁),油温上升至 80 ℃,达到鱼肉蛋白质的变性温度,3 种蛋白质的 ΔH 分别下降 64.17%,92.86%,66.67%,表明该阶段绝大部分肌浆蛋白发生变性。继续加热至 S₂,肌球蛋白和肌动蛋白变性程度进一步提升,而肌浆蛋白变化较小;加热后期肌浆蛋白完全变性。因此,微波加热初期蛋白质的变性会明显



M₁为肌球蛋白, M₂为肌浆蛋白, M₃为肌动蛋白

图 3 鱼肉的 DSC 曲线

Figure 3 DSC curves of fish meat

提升鱼肉嫩度^[16],再继续加热,蛋白质变性不再成为影响鱼肉嫩度的主要内因。

2.4 鱼肉微观组织结构的变化

由图 4 可知,生肉样品具有明显的肌肉纤维组织;经短时间快速加热后(S₁),结缔组织迅速破裂,形成聚团;随着加热的不断进行(S₂),细胞组织结构逐渐断裂分散,肌原纤维不断被破坏收缩,鱼肉蛋白质开始相互联结;加热后期(S₃),鱼肉中蛋白质聚团缩小,且彼此交联,形成凝胶网络结构,鱼肉弹性增加,嫩度降低^[17]。

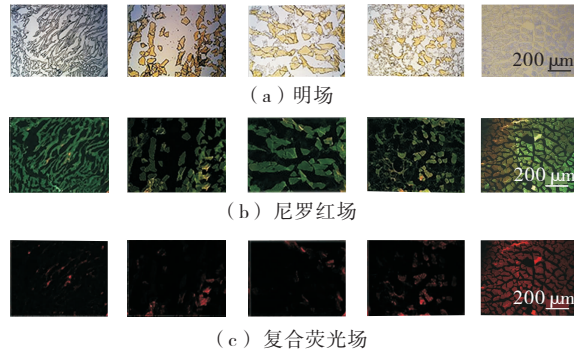
由图 4 还可知,微波一步法加热鱼肉过程中,油脂与蛋白质的结合从局部到整体,油脂从表面逐步渗入细胞内部,脂肪随着加热的进行逐渐均匀密集地附着在蛋白质聚团表面,并与鱼肉蛋白质充分接触。鱼肉与油脂共

表 2 蛋白质热焓变值变化[†]

Table 2 The enthalpy change (ΔH) of each protein during heating ($n=3$)

变性峰	变性温度/°C	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$				
		S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	CT
M ₁	41.83	168.91±4.63 ^a	55.94±3.21 ^b	2.45±0.47 ^c	4.38±0.11 ^c	6.31±0.20 ^c
M ₂	56.00	140.12±4.45 ^a	10.14±0.35 ^b	9.60±0.61 ^b	0.80±0.03 ^c	29.68±1.19 ^d
M ₃	63.17	117.08±4.20 ^a	36.71±1.73 ^b	6.03±0.58 ^c	7.33±0.60 ^c	10.02±0.66 ^d

[†] 同行字母不同表示差异显著(P<0.05); M₁为肌球蛋白变性峰, M₂为肌浆蛋白变性峰, M₃为肌动蛋白变性峰。



从左至右依次为S₀、S₁、S₂、S₃、CT

图 4 鱼肉微观结构的变化

Figure 4 The changes of fish meat microstructure

3 结论

试验围绕与鱼肉嫩度密切相关的最大剪切力、水分状态、蛋白质变性程度和微观结构等指标进行了研究。结果表明,以油相为介质进行微波烹饪的水煮鱼,其嫩度关键的影响因素为水分和蛋白质。加热前期,鱼肉肌肉组织被破坏,蛋白质发生变性、降解和溶出,部分结合水转化为不易流动水,嫩度显著提高;加热中期,由于蛋白质的凝胶化作用,少量不易流动水的弛豫时间降低,细胞组织及蛋白质在被破坏的过程中开始出现新的缔合,嫩度略有提高。加热后期,由于进入细胞中的油脂与蛋白质结合,以及油脂氧化产物对蛋白质产生影响,鱼肉弹性上升,鱼肉结构更紧致完整,与水煮、蒸制等体系中鱼肉嫩度变化机理不同。此外,该体系中,由于微波和油相环境的双重作用,鱼肉水分流失明显大于水相体系,在相同的加热时间和强度内,微波烹饪的鱼肉嫩度更低。因此,微波一步法烹饪水煮鱼的方式有利于维持鱼肉的组织完整性,并且赋予鱼肉更高的弹性口感,但水分损失更多。后续可对油脂与蛋白质结合机理,以及油脂氧化产物在微波条件下对蛋白质的影响进行深入研究。

参考文献

[1] 李升升, 靳义超, 闫忠心. 运输温度对牦牛肉品质的影响及其相关性分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 143-146.

- [2] PEARCE K L, ROSENVOLD K, ANDERSEN H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes: A review[J]. Meat Science, 2011, 89(2): 111-124.
- [3] LI Peng, WANG Hong-ti, SUN Jing-xin, et al. Effects of pressure-transform tumbling assisted by ultrasound on protein structure and water content of chicken[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 308-314.
- [4] 陈惠, 刘焱, 李志鹏, 等. 热加工对草鱼鱼肉品质及风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 53-68.
- [5] 邓丽, 李岩, 董秀萍, 等. 热加工过程中鲍鱼腹足蛋白间作用力及其质构特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 307-316.
- [6] 周兵兵. 微波技术在食品加工中的应用[J]. 现代食品, 2017, 4(13): 1-2.
- [7] 陈琳莉, 李侠, 张春晖, 等. 低场核磁共振法测定五种肉类中不同状态水分含量[J]. 分析科学学报, 2015, 31(1): 90-94.
- [8] WANG Xue-jiao, BERTRAND M, WANG Xing-wei, et al. Comparison between microwave and traditional water bath cooking on saltiness perception, water distribution and microstructure of grass carp meat[J]. Food research international, 2019, 125(1): 1-9.
- [9] 盛利斌, 刘书来, 吕飞, 等. 热煮对丁香鱼肌肉特性及质构的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 5-8.
- [10] YOU Juan, LOU Yong-kang, SHEN Hui-xing, et al. Effect of substrate ratios and temperatures on development of Maillard reaction and antioxidant activity of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) protein hydrolysate-glucose system[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 46(12): 2 467-2 474.
- [11] 潘薇娜. 微波对冷冻预油炸面拖食品脆性影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 31-37.
- [12] LI Miao-yun, WANG Hai-biao, ZHAO Gai-ming, et al. Determining the drying degree and quality of chicken jerky by LF-NMR[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 139(1): 43-49.
- [13] 章杰, 何航, 熊子标. 烹饪方式对猪肉品质及营养成分的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 21-29.
- [14] 杨宏旭, 刘大松, 李珺珂, 等. 低温贮藏条件下青鱼肉中蛋白和组织结构的变化对鱼肉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8): 208-213.
- [15] 姜启兴. 鲮鱼肉热加工特性及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 29-46.
- [16] CHRISTENSEN L B, HOVDA M B, RODE T M. Quality changes in high pressure processed cod, salmon and mackerel during storage[J]. Food Control, 2017, 72(1): 90-96.
- [17] 郁二蒙, 谢骏, 卢炳国, 等. 脆肉鲩与普通草鱼肌肉显微结构观察[J]. 南方农业学报, 2014, 45(4): 671-675.
- [18] 章银良, 安巧云, 杨慧, 等. 脂肪氧化诱导鱼蛋白聚集变性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(11): 161-164.
- [19] KONG Bao-hua, SUN Yan, JIANG Lin-zhou, et al. The effectiveness of butylated hydroxyanisole and α -tocopherol in inhibiting oxidant-induced chemical and structural changes of whey protein[J]. International Journal of Dairy Technology, 2012, 65(3): 353-359.
- [20] HUANG You-ru, HUA Yu-fei, QIU Ai-yong. Soybean protein aggregation induced by lipoxygenase catalyzed linoleic acid oxidation[J]. Food research international, 2006, 39(2): 240-249.
- [21] ZHANG Xiang-lun, LU Peng, XUE Wen-yue, et al. An evaluation of heat on protein oxidation of soy protein isolate or soy protein isolate mixed with soybean oil in vitro and its consequences on redox status of broilers at early age[J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2017, 30(8): 1 135-1 142.
- [22] CAI Lu-yun, FENG Jian-hui, CAO Ai-ling, et al. Denaturation kinetics and aggregation mechanism of the sarcoplasmic and myofibril proteins from grass carp during microwave processing[J]. Food & Bioprocess Technology, 2018, 11(2): 417-426.
- [23] GEORGE D F, BILEK M M, MCKENZIE D R. Non-thermal effects in the microwave induced unfolding of proteins observed by chaperone binding [J]. Bioelectromagnetics, 2008, 29(4): 324-330.

(上接第 31 页)

- [22] WANG Bo, LI Bo. Effect of molecular weight on the transepithelial transport and peptidase degradation of casein-derived peptides by using Caco-2 cell model[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 1-8.
- [23] 刘晓宇, 李荔, 刘志刚. 食物过敏原介导食物过敏机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2012, 3(4): 235-239.
- [24] FUKUIISHI N, MURAKAMI S, OHNO A, et al. Does β -hexosaminidase function only as a degranulation Indicator in mast cells? The primary role of β -hexosaminidase in mast cell granules[J]. Journal of Immunology, 2014, 193(4): 1 886-1 894.
- [25] KAWAI J, MORI K, HIRASAWA N. Grifola frondosa extract and ergosterol reduce allergic reactions in an allergy mouse model by suppressing the degranulation of mast cells[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2019, 83(12): 2 280-2 287.
- [26] FU Shui-lian, NI Sai-hong, WANG Dan-ni, et al. Berberine suppresses mast cell-mediated allergic responses via regulating Fc ϵ RI-mediated and MAPK signaling[J]. International Immunopharmacology, 2019, 71: 1-6.
- [27] DEMO S, MASUDA E, ROSSI A B, et al. Quantitative measurement of mast cell degranulation using a novel flow cytometric annexin-V binding assay[J]. Cytometry, 1999, 36: 340-348.