

升温速率对草鱼和鲢鱼糜胶凝特性的影响

吴晓丽 朱玉安 刘友明 熊善柏

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

摘要 以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)为试验材料,采用动态流变仪研究加热速率对草鱼和鲢鱼糜动态流变性质的影响,并根据非等温动力学模型计算出鱼糜凝胶的凝胶化温度和凝胶活化能。结果表明:在本试验研究的加热速率范围内,随着加热速率的增加,草鱼和鲢鱼糜的弹性模量(G')和耗能模量(G'')均呈降低趋势,而损耗角正切值($\tan\delta$)则呈增加趋势。增加加热速率使得草鱼和白鲢鱼糜的凝胶化温度(t_{gel})升高,凝胶活化能(E_a)下降。同一加热速率下,草鱼的凝胶化温度高于鲢,但凝胶活化能低于鲢。

关键词 草鱼; 鲢; 鱼糜; 加热速率; 胶凝特性

中图分类号 TS 254.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)04-0114-06

鱼糜制品加工中,加热是其重要的工序之一,肌原纤维蛋白受热变性聚集,形成有序的三维网络凝胶结构。研究表明,加热速率会影响蛋白凝胶强度、弹性、持水性及微观结构等凝胶特性^[1-3]。加热速率对鱼糜凝胶特性的影响与鱼种有关,对太平洋无须鲷(*Merluccius productus*)而言,在快的加热速率下,可以阻止鱼糜中蛋白酶对肌球蛋白重链的降解作用,从而提高蛋白凝胶特性^[4-6];对阿拉斯加狭鳕(*Theragra chalcogramma*)和太平洋真鳕(*Gadus morhua*)而言,慢的加热速率有利于鱼糜中内源性转谷氨酰胺酶催化非二硫共价键的形成,从而提高凝胶特性^[6-7],在慢的加热速率下,蛋白质聚集速率慢于变性速率,变性链易于更好定向,从而形成具有细致三维网络结构的凝胶,该凝胶具有良好的弹性^[8-9]。

笔者所在课题组前期的研究表明,不同加热方式对淡水鱼草鱼和鲢鱼糜凝胶品质有较大的影响,可能是因为3种加热方式的升温速率不同导致鱼糜蛋白变性和聚集的相对速率产生差异而造成的^[10]。本文运用动态流变仪,研究不同升温速率(1、5、8 °C/min)下,草鱼和鲢鱼糜热致凝胶过程中的流变行为,并在其基础上,根据非等温动力学模型研究鱼

糜凝胶的凝胶化温度和凝胶活化能,为揭示加热速率对鱼糜凝胶特性影响的机制做进一步研究,并为确定鱼糜制品加工适宜的加热方式提供一定的依据和指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*):体质量(2.0±0.3) kg,2014年秋季购于华中农业大学集贸市场;草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*):体质量(2.0±0.3) kg,2014年秋季购于华中农业大学集贸市场;氯化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BL220H型电子天平(日本岛津公司);K600型食物调理机(德国博朗电器);AR 2000ex型号动态流变仪(美国TA公司)。

1.3 凝胶的制备

新鲜草鱼、鲢用自来水清洗后去头、鳞和内脏,采得的鱼肉用5倍的自来水漂洗2次,再用5倍0.5% NaCl溶液漂洗1次,每次漂洗10 min,将漂洗后的肉沥干,漂洗温度控制在10 °C左右。向所得

收稿日期:2014-12-31

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)

吴晓丽,硕士研究生,研究方向:水产品加工及贮藏工程. E-mail: wuxiaolijxa@163.com

通信作者:刘友明,博士,副教授,研究方向:水产品加工及贮藏工程. E-mail: lym@mail.hzau.edu.cn

鱼肉中添加 2.5% NaCl 后斩拌 2 min, 添加冰水调整样品水分含量至 85%, 再斩拌 2 min, 斩拌过程温度保持在 10 °C 左右。

1.4 动态流变学参数的测定

取一定量的鱼糜置于载物台与圆形平板(直径为 4 cm)之间, 除去过量的样品, 并用液体石蜡封住样品以免水分蒸发, 载物台与平板间距为 1 000 μm 。采用 0.1 Hz 的振动频率振动样品, 剪切应力设为 10 Pa, 流变仪升温速率分别设为 1、5、8 °C/min。测定不同温度下鱼糜的弹性模量(G')、耗能模量(G'')和损耗角正切值($\tan\delta$)。

鱼糜胶凝过程中, 将数字巡回测温仪的探头插入凝胶中心, 采用间隔取样测定鱼糜凝胶中心温度, 计算两段式加热中 40 °C 水浴加热、90 °C 水浴加热及 100 °C 蒸汽加热平均升温速率, 分别为 1.50、4.80 及 8.50 °C/min, 因此, 本文设定流变仪升温速率分别为 1、5、8 °C/min, 以模拟和研究不同加热方式下鱼糜胶凝特性。

1.5 鱼糜蛋白凝胶温度的计算

根据高分子物理学的观点, t_{gel} 可定义为聚合物在温度扫描过程中储能模量 G' 发生显著变化时所对应的温度^[11]。本研究中凝胶化温度 t_{gel} 的计算主要依据储能模量 G' 与温度(40~70 °C)之间的函数关系, 参考 Yoon 等^[11]的方法进行。

1.6 鱼糜蛋白凝胶化活化能的计算

鱼糜凝胶的形成是蛋白变性聚集的过程, 形成和维持鱼糜凝胶网络结构的作用力, 有疏水相互作用、二硫键、离子键、氢键等。凝胶活化能是指蛋白质分子相互作用形成凝胶所需克服的能垒, 是衡量

蛋白质凝胶化反应难易程度的指标^[12]。凝胶活化能 E_a 参考 Yoon 等^[11]的方法计算。

1.7 数据处理

采用 SAS 8.0 软件进行数据分析, 采用 Origin 8.0 软件进行绘图。试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 升温速率对鱼糜弹性模量的影响

从图 1 可知, 2 种鱼糜弹性模量 G' 变化趋势相近, 升温速率为 1 °C/min 时, 弹性模量 G' 在升温过程中主要经历 3 个过程: 第一阶段为 10~38.9 °C, 肌球蛋白 S1 亚基变性展开, 肌球蛋白头部之间发生交联, 使鱼糜弹性模量 G' 增加; 第二阶段为 38.9~47.1 °C, 随着温度的升高, 鱼糜的 G' 迅速下降, 其原因可能是肌动球蛋白解离及肌球蛋白尾部变性展开; 氢键为主的低温凝胶化网络结构被破坏; 鱼糜中内源性组织蛋白酶水解肌球蛋白, 导致凝胶结构的破坏^[13]; 第三阶段为 47.1~80 °C, 弹性模量 G' 迅速升高, 80 °C 以后鱼糜凝胶弹性模量 G' 基本稳定, 说明蛋白进一步变性聚集, 形成了最终稳定的凝胶。当升温速率为 5 和 8 °C/min 时, 弹性模量 G' 在升温过程中主要经历 2 个过程, 弹性模量 G' 先降低后升高, 在 50 °C 左右达到最低值。1、5 和 8 °C/min 升温速率下, 鱼糜凝胶弹性模量 G' 峰谷温度分别出现在 47.1、51.6 和 55.3 °C, 说明升温速率的增加使得弹性模量 G' 峰谷温度往高温段移动, Yong sawatdigul 等^[6]在试验中同样发现, 太平洋无须鲷肌球蛋白升温速率从 0.5 °C/min 升高到 2 °C/min 时, 弹性模量 G' 峰谷温度从 55 °C 升高到 66 °C。

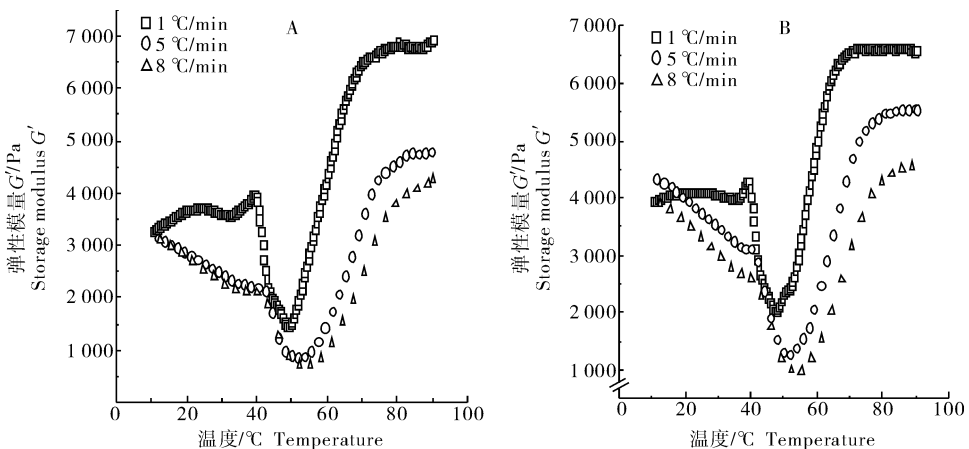
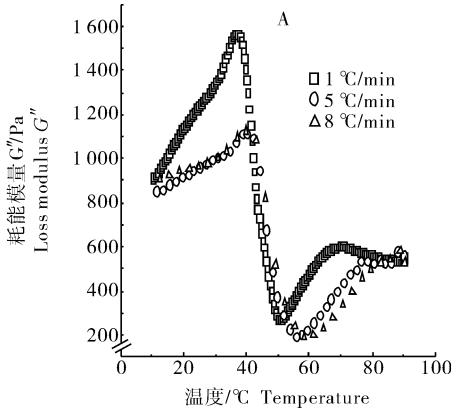


图 1 升温速率对草鱼(A)和鲢(B)鱼糜弹性模量的影响

Fig.1 Effects of heating rate on storage modulus(G') of grass carp(A) and silver carp(B) surimi

2.2 升温速率对鱼糜耗能模量的影响

由图 2 可知,耗能模量 G'' 在升温过程中主要经历 3 个过程,对于不同的升温速率、不同的鱼种,3 个阶段的温度范围不完全一致。草鱼鱼糜以 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温时,耗能模量 G'' 在 $10\sim 38\text{ }^\circ\text{C}$ 迅速增大, $38\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 急剧下降, $50\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 又逐渐增加,提高升温速率,耗能模量 G'' 峰值温度往高温段偏移,出现在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,而耗能模量 G'' 峰谷温度有明显的升温速率依赖性,升温速率为 $1, 5$ 和 $8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,



耗能模量 G'' 峰谷温度分别出现在 $50, 55$ 和 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 左右;鲢鱼糜热致凝胶过程中耗能模量 G'' 变化规律与草鱼糜相似,有所不同的是鲢鱼糜耗能模量 G'' 峰值和峰谷温度更具有升温速率依赖性,升温速率为 $1, 5$ 和 $8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的耗能模量 G'' 峰值温度分别为 $35, 40$ 和 $42\text{ }^\circ\text{C}$, G'' 峰谷温度分别为 $52, 59$ 和 $62\text{ }^\circ\text{C}$ 。鱼糜在升温速率为 $5, 8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 加热时,弹性模量 G' 在低温段 ($< 40\text{ }^\circ\text{C}$) 下降,而耗能模量 G'' 在低温段 ($< 40\text{ }^\circ\text{C}$) 增加,这可能是由于蛋白受热后变性展开,

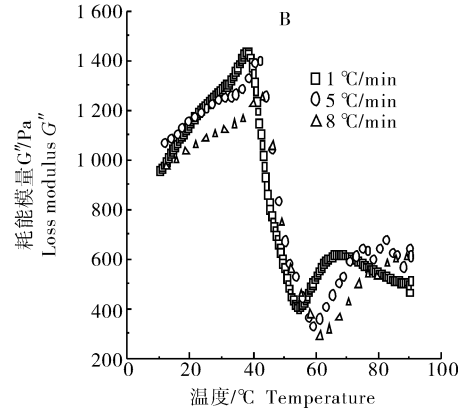


图 2 升温速率对草鱼(A)和鲢(B)鱼糜耗能模量的影响

Fig.2 Effects of heating rate on loss modulus (G'') of grass carp (A) and silver carp (B) surimi

与水分子相互作用增强^[14],耗能模量 G'' 增加。

2.3 升温速率对鱼糜损耗角正切的影响

$\tan\delta$ 为 G'' 与 G' 的比值,升温过程中鱼糜的弹性模量 G' 均大于耗能模量 G'' ,即 $\tan\delta$ 小于 1,说明鱼糜凝胶弹性固体性质突出,具有较好的胶凝性^[15]。由图 3 可知,升温过程中,草鱼鱼糜 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温的 $\tan\delta$ 变化较丰富,分别在 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $44\text{ }^\circ\text{C}$ 出现了 2 个峰值; $10\sim 34\text{ }^\circ\text{C}$, $\tan\delta$ 随温度升高

而增加; $34\sim 39\text{ }^\circ\text{C}$,随温度升高, $\tan\delta$ 下降; $39\sim 44\text{ }^\circ\text{C}$, $\tan\delta$ 随温度升高而增加; $44\text{ }^\circ\text{C}$ 后, $\tan\delta$ 迅速下降。鲢鱼糜 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温呈现相似的变化规律。升温速率为 $5, 8\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,草鱼和鲢鱼糜 $\tan\delta$ 均先增加后减小,在 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 达到最大值,与弹性模量 G' 变化趋势相反。3 种加热速率下,草鱼和鲢鱼糜 $\tan\delta$ 总体上呈先上升后下降的趋势,在低温段 ($< 45\text{ }^\circ\text{C}$),鱼糜蛋白变性展开,与水分子相互作用

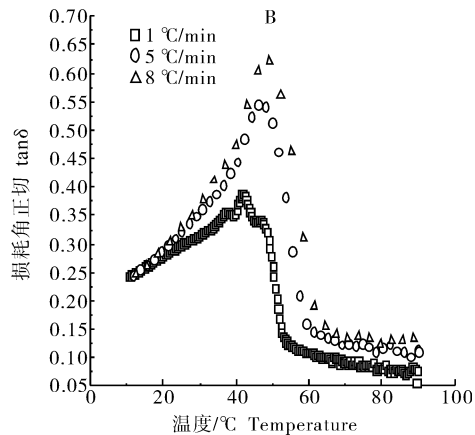
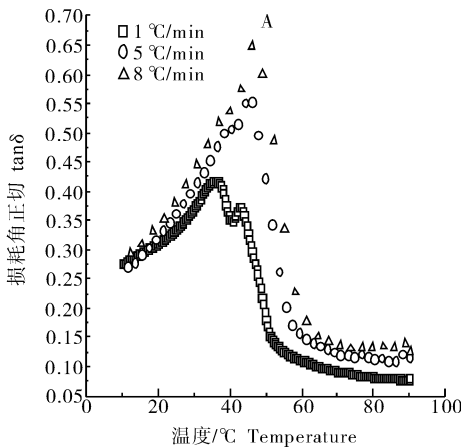


图 3 升温速率对草鱼(A)和鲢(B)鱼糜损耗角正切的影响

Fig.3 Effect of heating rate on $\tan\delta$ of grass carp (A) and silver carp (B) surimi

增强^[14], $\tan\delta$ 增加, 随后蛋白变性聚集增强, 鱼糜从溶胶转为凝胶结构, $\tan\delta$ 下降。升温速率的增加同样使得 $\tan\delta$ 增加, $\tan\delta$ 峰值向高温方向移动。

2.4 升温速率对鱼糜凝胶活化温度及活化能的影响

如表 1 所示, 草鱼和鲢鱼糜凝胶化温度均随着升温速率的增加而增大, 草鱼凝胶化温度从

47.86 °C 升高到 53.61 °C, 鲢鱼糜凝胶化温度从 47.01 °C 升高到 53.25 °C; 在同一加热速率下, 草鱼凝胶化温度略高于鲢。有研究结果表明, 15% 乳清蛋白^[16]和 10% β -乳球蛋白^[17]随着升温速率的增加, 凝胶化温度增加。在较低的升温速率下, 鱼糜的凝胶网络结构形成于较低的温度, 说明鱼糜蛋白在后续的加热过程中, 有更多的时间变性聚集, 更有利于形成较好弹性的凝胶。

表 1 不同升温速率下草鱼和鲢鱼糜凝胶化温度

Table 1 The gelation temperature of grass carp and silver carp surimi at different heating rate

鱼种 Fish species	升温速率/(°C/min) Heating rate	β	α_1	α_2	α_3	R^2	凝胶化温度/°C Gelation temperature
草鱼 Grass carp	1	168 984	-9 067.9	159.66	-0.904 4	0.997	47.86
	5	46 013	-2 093.4	30.334	-0.130 1	0.987	51.70
	8	33 499	-1 449.2	19.885	-0.079 2	0.987	53.61
鲢 Silver carp	1	184 208	-10 011	179.21	-1.034 1	0.997	47.01
	5	94 488	-4 614.3	737.68	-0.374 7	0.997	51.42
	8	69 946	-3 286.3	50.451	-0.245 3	0.998	53.25

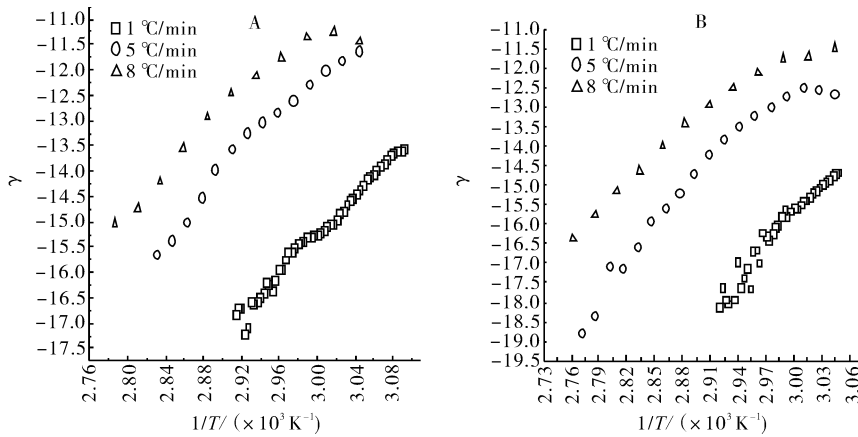


图 4 不同升温速率下草鱼(A)和鲢(B)鱼糜的 γ 与 $1/T$ 的关系曲线

Fig.4 The arrhenius-type plots for the changes in G' of grass carp (A) and silver carp(B) surimi during gelation at different heating rate (for $n=2, \gamma = \ln [(1/G')^2 (dG'/dt)]$)

在 40~70 °C 温度范围内, 鱼糜蛋白凝胶过程按二级反应进行拟合, γ 与 $1/T$ 进行多元线性回归, 多元线性回归结果如图 4 所示, 图 4 中拟合直线的斜率用来计算凝胶活化能 E_a , 拟合系数和结果如表 2 所示, 拟合精度 R^2 都在 0.94 以上, 说明拟合效果较好。活化能是衡量蛋白质凝胶化反应难易程度的指标, 在同一加热速率下, 鲢的凝胶活化能高于草鱼。随着升温速率的增加, 2 种鱼糜的凝胶活化能均减小, 说明鱼糜蛋白在较高的加热速率下更易变性聚集。

表 2 不同升温速率下草鱼和鲢鱼糜凝胶活化能

Table 2 The activation energy of grass carp and silver carp surimi at different heating rate

鱼种 Fish species	升温速率/(°C/min) Heating rate	R^2	凝胶活化能/(kJ/mol) Activation energy
草鱼 Grass carp	1	0.98	162.55
	5	0.97	158.92
	8	0.94	130.08
鲢 Silver carp	1	0.94	226.64
	5	0.94	194.28
	8	0.96	148.36

3 讨论

在同一加热速率下,草鱼鱼糜凝胶活化能明显低于鲢鱼糜,这可能是因为草鱼属于难凝胶化和难凝胶劣化鱼种,而鲢属于难凝胶化和易凝胶劣化的鱼种^[18];草鱼鱼糜凝胶化温度略高于鲢鱼糜,这可能与肌原纤维蛋白的热稳定性有关。研究表明,草鱼肌原纤维蛋白的热稳定性高于鲢肌原纤维蛋白^[19]。本试验研究表明,升温速率的增加可导致草鱼和鲢鱼糜凝胶化温度升高。对卵清蛋白^[20]、豌豆球蛋白^[21]和蛋清蛋白^[22]的研究发现,升温速率的增加可使蛋白质的变性温度(t_d)升高,从而增加蛋白质的热稳定性。Yuan等^[23]在研究鲢鱼糜凝胶特性时认为,鱼糜肌原纤维蛋白热稳定性与凝胶形成温度存在相关性,肌原纤维蛋白热稳定性越高,则其凝胶形成温度也越高。因此,可以推测加热速率的增加使得鱼糜蛋白热稳定性增加,凝胶化温度增加。

活化能是衡量蛋白质凝胶化反应难易程度的指标,Yoon等^[11]认为阿拉斯加狭鳕和太平洋真鳕鱼糜蛋白含量越高,更容易形成凝胶。贾丹等^[13]认为TGase的添加会增大鳙鱼糜蛋白质分子间的接触概率,更容易产生分子链间的交联,鱼糜蛋白质形成凝胶所需要克服的能垒变小,更容易形成凝胶。本试验结果表明,提高加热速率可导致鱼糜凝胶活化能降低,即在高的升温速率下,蛋白变性速率快,鱼糜蛋白质变性聚集所需要克服的能垒变小,更易于变性聚集。Vermeer等^[24]在研究免疫球蛋白变性聚集时发现,增加升温速率可加快免疫球蛋白变性聚集速率,这与本研究结果是一致的。

在本试验所研究的加热速率范围内,低的加热速率可使最终形成的鱼糜凝胶弹性模量 G' 增加(70~80℃)。一般而言,鱼糜凝胶完全形成时弹性模量 G' 越高,则其凝胶破断力和凝胶强度也越高^[25]。说明在慢的加热速率下可以促进草鱼和鲢鱼糜蛋白之间交联,提高鱼糜凝胶的强度。加热速率对鱼糜凝胶特性的影响可能与鱼糜中的内源酶活性有关。鱼糜凝胶形成过程中内源性转谷氨酰胺酶催化的蛋白质交联能增强鱼糜凝胶强度,而内源性组织蛋白酶引起的蛋白质降解则可导致蛋白质凝胶结构破坏,从而引起凝胶劣化。对于鲢和草鱼鱼糜的凝胶形成过程而言,内源性转谷氨酰胺酶对鱼糜凝胶特性的影响可能占主导地位。

参 考 文 献

- [1] STEVENSON C D, LIU W, LANIER T C. Rapid heating of Alaska pollock and chicken breast myofibrillar protein gels as affecting water-holding properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(40): 10111-10117.
- [2] CAMOU J P, SEBRANEK J G, OLSON D G. Effect of heating rate and protein concentration on gel strength and water loss of muscle protein gels [J]. *Journal of Food Science*, 1989, 54(4): 850-854.
- [3] RIEMANN A E, LANIER T C, SWARTZEL K R. Rapid heating effects on gelation of muscle proteins [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(7): 308-314.
- [4] TADPITCHAYANGKON P, PARK J W, YONGSAWATDIGUL J. Gelation characteristics of tropical surimi under water bath and ohmic heating [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 97-103.
- [5] 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.
- [6] YONGSAWATDIGUL J, PARK J W. Thermal aggregation and dynamic rheological properties of pacific whiting and cod myosins as affected by heating rate [J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(4): 679-683.
- [7] YONGSAWATDIGUL J, PARK J W. Linear heating rate affects gelation of Alaska pollock and pacific whiting surimi [J]. *Journal of Food Science*, 1996, 61(1): 149-153.
- [8] HERMANSSON A M. Physico-chemical aspects of soy proteins structure formation [J]. *Journal of Texture Studies*, 1978, 9: 33-58.
- [9] HERMANSSON A M. Aggregation and denaturation involved in gel formation [J]. *Functionality and Protein Structure*, 1979, 92: 82-103.
- [10] 朱玉安, 刘友明, 张秋亮, 等. 加热方式对鱼糜凝胶特性的影响 [J]. *食品科学*, 2011, 32(23): 107-110.
- [11] YOON W B, GUNASEKARAN S, PARK J W. Characterization of thermorheological behavior of Alaska pollock and pacific whiting surimi [J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(7): 338-343.
- [12] 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*, 2006, 29(4): 547-551.
- [13] 贾丹, 刘茹, 刘明菲, 等. 转谷氨酰胺酶对鳙鱼糜热诱导凝胶特性的影响 [J]. *食品科学*, 2013, 34(9): 37-41.
- [14] AHMAD M U, TASHIRO Y, MATSUKAWA S, et al. Gelation mechanism of surimi studied by ¹H NMR relaxation measurements [J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(6): 362-367.
- [15] 李勇, 程裕东. 白鲢鱼糜流变特性的研究 [J]. *食品科学*, 2007, 28(10): 100-104.
- [16] LI J, ELEVA M M O, GUNASEKARAN S. Gelation of whey protein and xanthan mixture; effect of heating rate on rheological properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(5): 678-686.

- [17] RAFE A, RAZAVI S, KHAN S. Rheological and structural properties of β -lactoglobulin and basil seed gum mixture; effect of heating rate [J]. *Food Research International*, 2012, 49: 32-38.
- [18] 吴汉民, 王海洪, 韩素珍, 等. 几种淡水鱼鱼糜特性的研究[J]. *食品科学*, 1999, 20(9): 15-19.
- [19] 潘世玲. 鲤, 草, 鲢, 鳙加工冷冻生鱼糜的特性研究[D]. 北京: 中国农业大学图书馆, 2003.
- [20] ARNTFIELD S D, MURRAY E D. Heating rate affects thermal properties and network formation for vicilin and ovalbumin at various pH values [J]. *Journal of Food Science*, 1992, 57(3): 640-646.
- [21] SHARMA D. Non-isothermal unfolding/denaturing kinetics of egg white protein [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, 109(3): 1139-1143.
- [22] MESSION J L, SOK N, ASSIFAOU A, et al. Thermal denaturation of pea globulins (*Pisum sativum* L.)-molecular interactions leading to heat-induced protein aggregation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(6): 1196-1204.
- [23] YUAN C, FUKUDA Y, KANENIWA M, et al. Comparison of gel-forming properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi prepared in different seasons [J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(5): 326-331.
- [24] VERMEER A W P, NORDE W. The thermal stability of immunoglobulin: unfolding and aggregation of a multi-domain protein [J]. *Biophysical Journal*, 2000, 78(1): 394-404.
- [25] YIN T, PARK J W. Effects of nano-scaled fish bone on the gelation properties of Alaska pollock surimi [J]. *Food Chemistry*, 2014, 150: 463-468.

Effect of heating rate on gelation properties of grass carp and silver carp surimi

WU Xiao-li ZHU Yu-an LIU You-ming XIONG Shan-bai

*College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University/
National R & D Branch Center for Conventional Fresh water Fish Processing (Wuhan),
Wuhan 430070, China*

Abstract To evaluate the effect of heating rate on gelation properties of silver carp and grass carp surimi, the dynamic rheological properties, gelation temperature (t_{gel}) and activation energy (E_a) of the surimi under different heating rates (1 °C/min, 5 °C/min and 8 °C/min) were investigated. Results showed that storage modulus G' and loss modulus G'' of silver carp and grass carp surimi were higher, while loss angle tangent $\tan\delta$ were lower in the 1 °C/min group than that in the 5 °C/min and 8 °C/min groups. The gelation temperature increased, but gel activation energy decreased with heating rate increasing. Gelation temperature of silver carp surimi was lower than that of grass carp, but gel activation energy was higher than that of grass carp at the same heating rate.

Key words silver carp; grass carp; surimi; heating rate; gelation properties

(责任编辑:边书京)