

# 草鱼鱼鳞胶原蛋白的流变学性能研究

汪海波, 王孟津, 张寒俊, 徐群英

(武汉工业学院化学与环境工程学院, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 以草鱼鱼鳞为原料, 在低于蛋白变性温度的条件下提取酸溶性胶原蛋白(acid-soluble collagens, ASC)和酶溶性胶原蛋白(pepsin-soluble collagens, PSC), 并对其溶液流变学性能进行系统测定。实验结果表明, 在实验选择的剪切速率范围内, ASC 和 PSC 溶液均表现为典型非牛顿流体的假塑性流动行为, 即溶液黏度随剪切速率的增加而减小; 在相同浓度条件下, 溶液黏度的大小依次为 ASC > PSC > 明胶; 剪切速率、温度、pH 值等因素对 ASC 和 PSC 溶液流体性能均有显著影响; 在 0.6% 浓度条件下, ASC 和 PSC 溶液主要表现为流体行为, 基本不具备凝胶的弹性行为; 胶原蛋白发生热变性后, 其流体的弹性行为增强而黏性行为下降。

**关键词:** 草鱼鱼鳞; 胶原蛋白; 流变学性能

## Rheological Properties of Collagens in Scale of Grass Carp

WANG Hai-bo, WANG Meng-jin, ZHANG Han-jun, XU Qun-ying

(School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** Acid-soluble collagens (ASC) and pepsin-soluble collagens (PSC) were extracted from scales of grass carp at the low temperature condition. The rheological properties of ASC and PSC were also determination. Results indicated that a non-Newtonian pseudoplastic flow behavior was observed in ASC and PSC. Under the condition of same concentration, the viscosity order of several kinds of collagens was ASC, PSC and Glutin. The rheological properties of ASC and PSC were significantly affected by concentration, temperature and pH. At the concentration of 0.6%, ASC and PSC displayed a liquid behavior without elasticity behavior of gel. However, denaturalization of collagens through heating resulted in an enhancement of elasticity behavior and reduction of viscous behavior in collagens.

**Key words:** scale of grass carp; collagen; rheological property

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2009)23-0138-05

近年来, 随着胶原蛋白应用领域的不断拓展和产品需求量的日益增加, 传统的胶原蛋白来源(人体胚胎、陆生动物的结缔组织和皮肤等)已不能满足正常需要, 世界各国都开始关注水生动物中胶原蛋白资源的开发。国内外学者围绕鱼类胶原蛋白展开了大量研究, 内容涉及胶原蛋白的提取和化学结构及超微结构分析、海洋环境等因素对鱼类胶原蛋白含量的影响以及在储藏和加工过程中胶原蛋白的降解对鱼加工性能的影响等<sup>[1-6]</sup>。与海洋鱼类相比, 国内外学者对淡水鱼胶原蛋白的关注程度较低, 为数不多的相关研究主要集中在某种淡水鱼鱼皮或鱼肌肉中胶原蛋白的含量测定、氨基酸组成和胶原蛋白类型的鉴定等方面<sup>[7-11]</sup>。与此同时, 在胶原蛋白的诸多新应用领域中, 都无一例外的对胶原蛋白产品的生物学性能, 特别是溶解性、流变特性和黏弹特性等提出

了相应要求。如在化妆品、保健食品以及医学组织工程材料的应用中都要求胶原蛋白产品具有良好的水溶性、保水性和黏弹性等<sup>[12]</sup>。因此, 这些性能已成为确定胶原蛋白应用方向和利用价值的重要指标。目前针对淡水鱼胶原蛋白溶液流体性能和黏弹性能方面的研究仍鲜有报道, 为此, 本研究以草鱼鱼鳞为原料, 制备胶原蛋白产品并对其溶液流变学性能进行系统测定, 为淡水鱼鱼鳞胶原蛋白的开发和应用提供可以借鉴的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

市售新鲜草鱼, 取鱼鳞, 用清水仔细洗涤干净后冷冻保藏备用。

收稿日期: 2009-08-31

基金项目: 湖北省教育厅资助项目(Q20081804); 武汉市科技局科技攻关计划项目(200920137006);

武汉工业学院大学生创新性实验计划资助项目(ZD14)

作者简介: 汪海波(1971—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为天然产物化学。E-mail: wanghaibo@whpu.edu.cn

牛血清白蛋白、胃蛋白酶、酪蛋白和商品明胶 武汉大风生物技术有限公司;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、EDTA、乙酸等化学试剂均为国产分析纯。

## 1.2 仪器与设备

Cary-50 紫外可见分光光度计 美国 Varian 公司; DF-101S 集热式恒温磁力搅拌机 河南巩义科学仪器厂; AR500 动态流变仪 美国 TA 仪器公司; TDL-50 离心机 上海安亭科学仪器厂; ZFQ85-A 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; Lg105-2 真空冷冻干燥机 北京医用实验仪器厂。

## 1.3 方法

### 1.3.1 鱼鳞胶原蛋白的制备

以下所有实验步骤均在低于 20℃ 的条件下进行:



### 1.3.2 鱼鳞胶原蛋白流变特性的研究<sup>[13-14]</sup>

#### 1.3.2.1 蛋白浓度、种类及剪切速率等对溶液流体性能的影响

用去离子水配置不同浓度的 ASC 和 PSC 水溶液, 用 AR-500 动态流变仪测定溶液的黏度(剪切应力)曲线。测定条件: 温度 20℃, 椎板 40mm, 2°, 测定采用流动模式, 数据获取为连续模式, 以剪切速率为变量, 变量范围从 0.1~1000s<sup>-1</sup>, 变量扫描为线性模式, 采集 50 个变量点。

#### 1.3.2.2 温度对胶原蛋白水溶液流体特性的影响

用去离子水配置 0.6% 浓度的 ASC 和 PSC 水溶液, 用 AR-500 动态流变仪测定溶液的黏度受温度的影响曲线。测定条件为: 椎板 40mm, 2°, 测定为流体模式, 数据获取为温度递增模式, 扫描范围从 10~80℃, 在 10min 内完成, 采集 50 个变量点, 控制变量为剪切速率(100s<sup>-1</sup>)。

#### 1.3.2.3 体系 pH 值对胶原蛋白水溶液流动特性的影响

用去离子水配置 0.6% 浓度的 ASC 和 PSC 水溶液, 分别用稀 HCl 和 NaOH 溶液调节水溶液体系中的 pH 值至中性(pH7)、酸性(pH4)和碱性(pH10), 考察其对胶原蛋白的流动特性的影响。测定条件同 1.3.2.1 节。

### 1.3.3 胶原蛋白流体的黏弹性能的研究<sup>[15]</sup>

#### 1.3.3.1 胶原蛋白黏弹曲线测定

用去离子水配置 0.6% 浓度的 ASC 和 PSC 水溶液, 用 AR-500 动态流变仪测定其黏弹性能曲线。测定条件: 温度 25℃, 40mm, 2° 椎板, 在振荡(Oscillation)模式下测定, 采用频率扫描的数据获取模式, 频率扫描范围(rad/s)从 150~0.01, 变量扫描为线性模式, 采集 30 个变量点, 控制变量为形变率(30%)。

#### 1.3.3.2 温度对胶原蛋白黏弹性能的影响

考察在一定振荡频率的条件下, 温度的改变对胶原蛋白黏弹性能的影响。测定条件: 40mm, 2° 椎板, 平衡时间 1min, 振荡测定模式, 采集 50 个变量点, 温度扫描范围从 10~80℃, 振荡频率(rad/s)为 60, 数据获取模式为温度扫描模式。控制变量为形变率(30%)。

## 2 结果与分析

### 2.1 草鱼鱼鳞胶原蛋白样品的制备

以草鱼鱼鳞为原料, 分别采用乙酸提取和酶水解 + 乙酸提取的方法制备酸溶性胶原蛋白(ASC)和酶溶性胶原蛋白(PSC)。经过分离纯化和冷冻干燥所得到的 ASC、PSC 产品均为白色、蓬松状样品, 经测定其样品中总蛋白含量分别为 92.8% 和 93.6%。

### 2.2 蛋白浓度及种类对溶液流体性能的影响

高分子溶液的流变学分类主要取决于其承受剪切应力时的力学效应, 该力学效应可用牛顿幂律方程来表示:

$$\eta_s = k \times r^{n-1}$$

式中:  $\eta_s$  为表观黏度(Pa·s);  $r$  为剪切速率(s<sup>-1</sup>);  $n$  为流动指数, 它的大小表示高分子溶液偏离牛顿流体的程度。

理想牛顿流体的  $n=1$ , 即表观黏度在任何剪切速率下均为常数。当  $n < 1$  时, 该种流体称为假塑性流体, 表观黏度随剪切速率的增加而下降; 当  $n > 1$  时, 该种流体称为胀塑性流体, 表观黏度随剪切速率的增加而增

加。假塑性流体和胀塑性流体都属于非牛顿流体的范畴。牛顿幂律方程中的参数  $k$  为浓度系数, 数值与流体的浓度有关<sup>[16]</sup>。

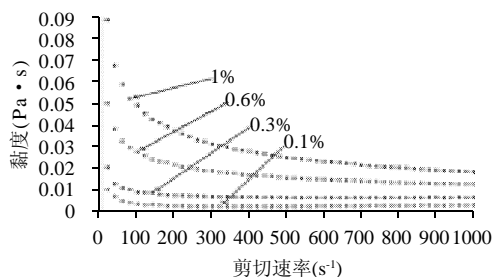


图1 浓度对ASC流体性能的影响

Fig.1 Effect of concentration on rheological properties of ASC

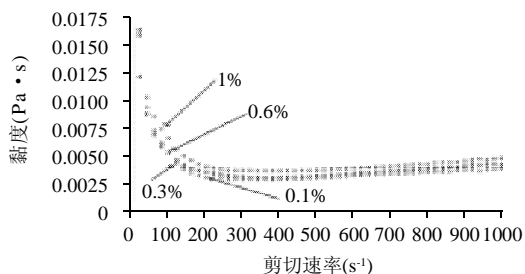


图2 浓度对PSC流体性能的影响

Fig.2 Effect of concentration on rheological properties of PSC

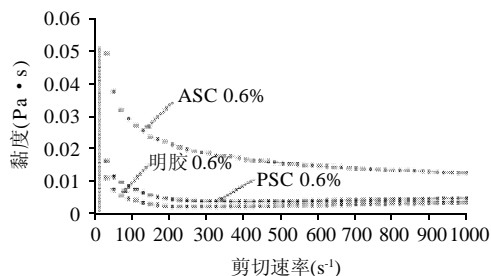


图3 几种胶原蛋白的流体性能比较

Fig.3 Comparison of rheological properties in three kinds of collagens

分别配制由低到高4个浓度的ASC和PSC水溶液, 在剪切速率  $0.1 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$  范围内, 利用动态流变仪测定其流动曲线, 如图1、2所示。同时, 利用仪器自带的TA data analysis 计算机软件对各浓度流动曲线进行幂律方程的自动拟合(剪切速率  $0.1 \sim 600 \text{ s}^{-1}$  范围), 得到不同浓度胶原蛋白溶液的流体幂律方程及相关参数(表1)。从流体曲线可以发现, 在该剪切速率范围内, 草鱼鱼鳞胶原蛋白ASC和PSC的溶液表观黏度均随浓度的加大而增高, 不同浓度的蛋白溶液均表现典型非牛顿流体的假塑性流动行为, 即溶液黏度随剪切速率的增加而减小。与PSC相比, 在相同剪切速率条件下, 不同浓度ASC溶液之间的黏度差异更为明显, 说明浓度对ASC溶液黏度和流体性能的影响更大。在相同浓度条件下, 溶液黏度的大小依次为  $\text{ASC} > \text{PSC} > \text{明胶}$ (图3)。

表1 计算机拟合不同浓度胶原蛋白的牛顿幂律方程及相关参数

Table 1 Newtonian power-law equation and parameters of collagens with various concentrations through computer fitting

蛋白种类	蛋白浓度	牛顿幂律方程	$n$	$k$
ASC	0.1%	$\eta_s = 1.62 \times 10^{-3} \times \dot{\gamma}^{1.064-1}$	1.064	$1.62 \times 10^{-3}$
	0.3%	$\eta_s = 1.57 \times 10^{-2} \times \dot{\gamma}^{0.8589-1}$	0.8589	$1.57 \times 10^{-2}$
	0.6%	$\eta_s = 0.129 \times \dot{\gamma}^{0.6621-1}$	0.6621	0.129
	1.0%	$\eta_s = 0.353 \times \dot{\gamma}^{0.5746-1}$	0.5746	0.353
PSC	0.1%	$\eta_s = 2.74 \times 10^{-3} \times \dot{\gamma}^{1.1126-1}$	1.1126	$2.74 \times 10^{-3}$
	0.3%	$\eta_s = 5.91 \times 10^{-3} \times \dot{\gamma}^{1.0023-1}$	1.0023	$5.91 \times 10^{-3}$
	0.6%	$\eta_s = 9.58 \times 10^{-3} \times \dot{\gamma}^{0.9677-1}$	0.9677	$9.58 \times 10^{-3}$
	1.0%	$\eta_s = 1.62 \times 10^{-2} \times \dot{\gamma}^{0.9082-1}$	0.9082	$1.62 \times 10^{-2}$

### 2.3 剪切速率对胶原蛋白流变学性能的影响

表2 不同剪切速率条件下拟合各浓度ASC溶液流动曲线方程及参数

Table 2 Newtonian power-law equation and parameters of ASC with various concentrations through computer fitting at different shear rates

浓度(%)	剪切速率范围( $\text{s}^{-1}$ )	牛顿幂率方程	$n$	$k$
0.1	0~200	$\eta_s = 0.06654 \times \dot{\gamma}^{0.3813-1}$	0.3813	0.06654
	200~400	$\eta_s = 3.681 \times 10^{-3} \times \dot{\gamma}^{0.9180-1}$	0.9180	$3.681 \times 10^{-3}$
	400~800	$\eta_s = 4.426 \times 10^{-4} \times \dot{\gamma}^{1.066-1}$	1.066	$4.426 \times 10^{-4}$
1	0~200	$\eta_s = 0.2611 \times \dot{\gamma}^{0.6347-1}$	0.6347	0.2611
	200~400	$\eta_s = 0.3666 \times \dot{\gamma}^{0.5690-1}$	0.5690	0.3666
	400~800	$\eta_s = 0.4103 \times \dot{\gamma}^{0.5511-1}$	0.5511	0.4103

从草鱼鱼鳞胶原蛋白的流体曲线中可以看到, 不仅蛋白浓度对溶液流体性能有显著影响, 流动剪切速率对流体性能也有影响。在较低剪切速率条件下, 溶液表观黏度  $\eta_s$  下降迅速, 而在较高剪切速率下, 溶液表观黏度下降缓慢。这种现象在低浓度的胶原蛋白溶液中表现尤为明显。利用计算机软件进一步对0.1%和1%浓度ASC溶液流体曲线在不同剪切速率范围内进行幂律方程的自动拟合, 拟合曲线方程见表2。结果表明, 剪切速率对ASC溶液流体幂律方程的浓度系数  $k$  和流动指数  $n$  均有较大影响。在较低浓度条件下(0.1%), 随着剪切速率的增大, 浓度系数( $k$ )急速减小, 流动指数( $n$ )逐渐增大, 表明在该浓度条件下, 剪切速率越大, 浓度对流动性能的影响越小; 同时, 随着剪切速率的增加, 其流动性能具有逐渐由假塑性流体( $n < 1$ )转变为牛顿流体( $n=1$ )的趋势, 该结果提示, 在较低浓度条件下, 高剪切速率可有效破坏蛋白分子内相互作用, 使其流动行为接近理想状态下的牛顿流体。与此相反, 在浓度较高的条件下(1%), 随着剪切速率的增大, 流动指数( $n$ )逐渐减小、浓度系数( $k$ )逐渐增大, 说明流体剪切稀化更加严重且溶液浓度对流体性能的影响逐渐增大。

### 2.4 温度对胶原蛋白流变学性能的影响

采用温度扫描模式测定ASC和PSC溶液表观黏度随温度变化的曲线, 并利用计算机软件自动拟合Arrhenius方程:  $\eta_s = A e^{E_a/RT}$  ( $\eta_s$  是一定温度条件下溶液表观黏度,  $A$  为常数,  $E_a$  为活化能, 反映了高分子流动的难易程度), 实验结果见图4和表3。结果表明, ASC

和PSC的溶液表观黏度均随着温度的升高而降低,同时,在黏度下降的过程中,ASC和PSC黏度曲线均出现一个黏度骤然下降的突变段,是胶原蛋白的受热变性过程。ASC和PSC的变性温度段分别为30~35℃和28~35℃,ASC在变性前后溶液黏度的变化明显大于PSC。利用计算机软件分别拟合变性前后蛋白黏度曲线的Arrhenius方程,分析其分子活化能 $E_a$ 的变化发现,ASC和PSC发生蛋白变性后,其分子活化能均显著降低(ASC的 $E_a$ 从1996k减小至1097k,PSC的 $E_a$ 从1680k减小至882k),溶液流动能力增强。

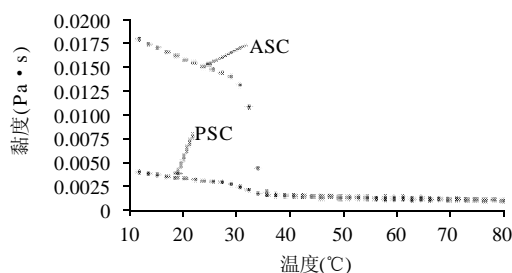


图4 温度对胶原蛋白流体性能的影响

Fig.4 Effect of temperature on rheological properties of collagens

表3 计算机拟合的Arrhenius方程及活化能 $E_a$

Table 3 Arrhenius equation and activated energy ( $E_a$ ) of ASC and PSC at different temperatures

蛋白种类	温度范围(°C)			
	10~30		35~80	
	Arrhenius equation	$E_a$	Arrhenius equation	$E_a$
ASC	$\eta_a = 2.7 \times 10^{-4} e^{1996/RT}$	1996k	$\eta_a = 5.3 \times 10^{-5} e^{1097/RT}$	1097k
PSC	$\eta_a = 1.1 \times 10^{-5} e^{1680/RT}$	1680k	$\eta_a = 9.2 \times 10^{-5} e^{882/RT}$	882k

## 2.5 体系pH值对胶原蛋白流变学性能的影响

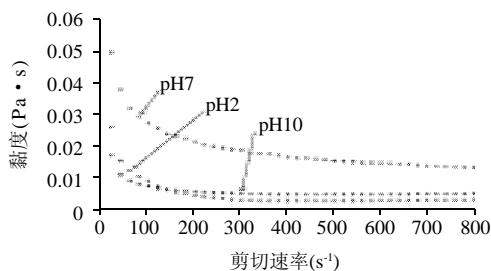


图5 pH值对0.6%ASC流体性能的影响

Fig.5 Effect of pH on rheological properties of ASC at the concentration of 0.6%

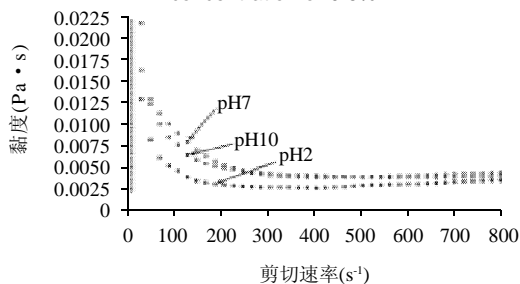


图6 pH值对0.6%PSC流体性能的影响

Fig.6 Effect of pH on rheological properties of PSC at the concentration of 0.6%

体系pH值对草鱼鱼鳞胶原蛋白流动性能的影响如图5、6所示。结果表明,pH值的改变对ASC和PSC溶液流变特性均具有不同程度的影响。中性条件下时,ASC和PSC的溶液黏度最大,碱性或酸性条件均可导致溶液黏度的下降。与PSC相比,pH值改变所导致的ASC溶液黏度的变化程度更大、更显著。

## 2.6 胶原蛋白黏弹性能测定

高聚物的黏弹性能常用振荡模型进行测定,即对高聚物分子施加一个扭摆力矩,使高聚物在此力矩下发生运动。当扭摆力矩的频率从高到低变化时,高分子链的运动也会发生相应改变,并由此测定其黏弹性能。通常高分子黏弹性能用Maxwell力学模型来表示: $G^* = G' + iG''$ ,其中, $G^*$ 为动态模量或绝对模量(Pa), $G'$ 为储存模量或弹性模量(Pa), $G''$ 为损耗模量或黏性模量(Pa)。弹性模量反映了高分子随外力的改变而发生形变的能力,而黏性模量则反映了高分子在外力作用发生改变时分子链内部或分子间拉伸导致的能量损耗。高聚物在振荡运动中的力学损耗可用正切损耗角 $\tan \delta$ 随振荡频率变化的改变来表示: $\tan \delta = G''/G'$ 。 $\tan \delta$ 大于1时,表示流体的黏性行为大于其弹性行为,当 $\tan \delta$ 小于1时,表示流体的弹性行为或刚性大于黏性行为<sup>[16]</sup>。

本实验利用动态流变仪的振荡模式对鱼鳞胶原蛋白高分子的黏弹性能及温度的改变对其影响进行了相关研究。

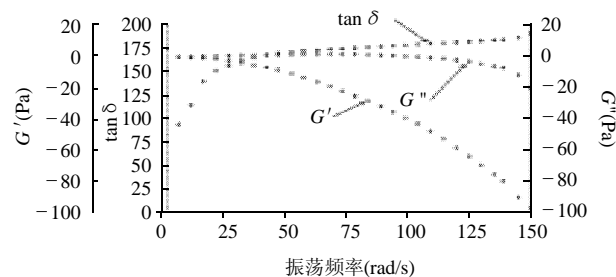


图7 0.6%ASC的黏弹图谱

Fig.7 Visco-elastic map of ASC at the concentration of 0.6%

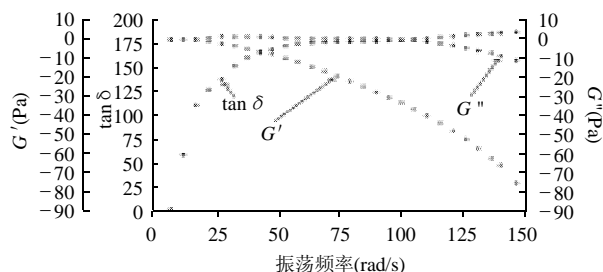


图8 0.6%PSC的黏弹图谱

Fig.8 Visco-elastic map of PSC at the concentration of 0.6%

图7和图8分别是ASC和PSC的黏弹性能测定图谱。从图中可以看到,在整个测定的振荡频率范围内,0.6%浓度的ASC和PSC流体都主要表现为黏性行为( $\tan \delta$ 大于1),

随着振荡频率的逐渐增大,  $G'$  迅速降低,  $G''$  基本维持不变, 该实验结果提示, 在 0.6% 的浓度条件下, 草鱼鱼鳞胶原蛋白 ASC 和 PSC 均为典型的流体行为, 基本不具备凝胶的弹性特征。

## 2.7 温度对胶原蛋白黏弹性能的影响

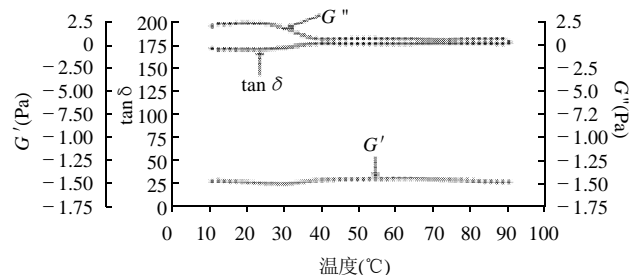


图9 温度对 0.6%ASC 黏弹性能的影响

Fig.9 Effect of temperature on visco-elastic property of ASC at the concentration of 0.6%

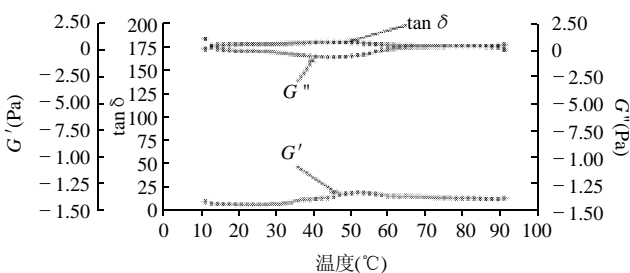


图10 温度对 0.6%PSC 黏弹性能的影响

Fig.10 Effect of temperature on visco-elastic property of PSC at the concentration of 0.6%

高聚物黏弹性不仅随振荡频率的改变而变化而且受温度的影响。图 9、10 分别是 ASC 和 PSC 的温度扫描图谱。从图中可以看到, 在蛋白的变性温度附近, ASC 和 PSC 的  $G'$  和  $G''$  均出现突变现象, 经过变性温度后, ASC 和 PSC 的  $G'$  值升高而  $G''$  值下降, 该结果提示, 胶原蛋白发生热变性后, 其流体的弹性行为增强而黏性行为下降。

## 3 结论

本研究以草鱼鱼鳞为原料, 在低于胶原蛋白变性温度的条件下, 分别采用乙酸提取和乙酸+酶水解提取的方法制备鱼鳞酸溶性胶原蛋白(ASC)和酶溶性胶原蛋白(PSC), 并以动态流变仪为测试手段, 重点研究了鱼鳞胶原蛋白 ASC 和 PSC 的溶液流变学性能和黏弹性能及其相关影响因素。实验结果表明, 在试验选择的剪切速率范围内, ASC 和 PSC 溶液均表现为典型非牛顿流体的

假塑性流动行为, 即溶液黏度随剪切速率的增加而减小, 在相同浓度条件下, 溶液黏度的大小依次为 ASC > PSC > 明胶; 剪切速率、温度、pH 值等因素对 ASC 和 PSC 溶液流体性能均有显著影响; 在 0.6% 浓度条件下, ASC 和 PSC 溶液主要表现为流体行为, 基本不具备凝胶的弹性行为, 胶原蛋白发生热变性后, 其流体的弹性行为增强而黏性行为下降。

## 参考文献:

- [1] SANKAR S, SEKAR S, MOHAN R, et al. Preparation and partial characterization of collagen sheet from fish scales[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2008, 42(1): 6-9.
- [2] PIPATCHAROENWONG C, GARNJANAGOONCHORN W, JIRAPAKKUL W. Collagen extraction of red snapper scales[C]. Proceedings of the 46th Kasetsart University Annual Conference, 2008: 33-40.
- [3] HARADA O, KUWATA M, YAMAMOTO T. Extraction of gelatin from sardine scales by pressurized hot water[J]. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology, 2007, 54(6): 261-265.
- [4] SAITO M, TAKENOCHI Y. Complete primary structure of rainbow trout type I collagen consisting of  $\alpha 1(I)$   $\alpha 2(I)$   $\alpha 3(I)$  heterotrimers[J]. European Journal of Biochemistry, 2006, 268(10): 2817-2827.
- [5] ESPE M, HAGENES T, GULBRANDSEN K E. Age of farmed atlantic salmon at seawater transfer affects muscle collagen content and solubility at harvest[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(5): 1814-1817.
- [6] GAO X, TASHIRO H O Y, ISO N. Rheological properties and structural changes in raw and cooked abalone meat[J]. Fisheries Science, 2001, 67(2): 314-320.
- [7] BRACHO G E, HAARD N F. Purification, characterization, and radiolabeling of Lingcod (*Ophiodon elongatus*) skin type I collagen[J]. Journal of Food Biochemistry, 2005, 19(4): 285-297.
- [8] SIVAKUMAR P, ARICHANDRAN R, SUGUNA L, et al. The composition and characteristics of skin and muscle collagens from a freshwater catfish grown in biologically treated tannery effluent water[J]. Journal of Fish Biology, 2000, 56(4): 999-1012.
- [9] KENJI S, REIJI Y, MAMORU S, et al. Biochemical characterization of collagen in myocommata and endomysium fractions of carp and spotted mackerel muscle[J]. Journal of Food Science, 2006, 58(6): 1511-1518.
- [10] WANG L. Isolation and characterization of collagen from the skin of deep-sea redfish (*Sebastes mentella*)[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(8): 450-455.
- [11] 钟朝辉, 李春美. 草鱼鳞酶溶性胶原蛋白的提取及基本特性[J]. 水产科学, 2007, 26(2): 91-95.
- [12] NISHIMOTO M, MIZUTA S, YOSHINAKA R. Characterization of molecular species of collagen in muscles of Japanese amberjack, *Seriola quinqueradiata*[J]. Food Chemistry, 2004, 84(1): 127-132.
- [13] 汪海波, 徐群英, 汪芳安. 低酯果胶的溶液流变学性能研究[J]. 农业工程学报, 2006(11): 223-227.
- [14] 汪海波, 徐群英. 几种生物柴油的制备及流体性能研究[J]. 燃料化学学报, 2008(5): 570-576.
- [15] 汪海波, 徐群英, 谢笔钧, 等. 燕麦  $\beta$ -葡聚糖的流变学特性研究[J]. 农业工程学报, 2008(5): 31-36.
- [16] 何曼君. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1988.