

# 草鱼皮明胶-可得然胶共混体系流变特性及作用机理的研究

蔡路昀<sup>1,2</sup>, 冯建慧<sup>1</sup>, 聂小华<sup>3</sup>, 励建荣<sup>1,2,\*</sup>, 赵 嵩<sup>4</sup>, 沈 琳<sup>5</sup>

(1.渤海大学食品科学与工程学院,生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术

国家地方联合工程研究中心,辽宁省食品安全重点实验室,辽宁锦州 121013;

2.西南大学食品科学学院,重庆 400715;

3.浙江工业大学海洋学院,浙江杭州 310014;

4.大连天宝绿色食品有限公司,辽宁大连 116001;

5.大连东霖食品股份有限公司,辽宁大连 116007)

**摘要:**为探讨可得然胶与草鱼皮明胶之间的相互作用,以草鱼皮明胶为原料,加入不同浓度的可得然胶,研究鱼皮明胶-可得然胶共混体系的粒径、流变学特性以及 FTIR 的影响。结果表明,共混体系的粒径随可得然胶浓度的增加而增大,当可得然胶浓度为 0.5% 时,粒径达到 1203.8 nm,约为明胶分子的 4 倍;动态流变学表明,共混体系具有更高的储能模量 G' 和损耗模量 G'',表现出较优越的黏弹特性,而且在低频率区域,可得然胶浓度对体系的粘性影响较大,在高频率区域对弹性影响较大;红外光谱扫描结果证实可得然胶与明胶发生相互作用。总之,添加可得然胶提高草鱼皮明胶的稳定性,对鱼皮明胶的广泛应用具有一定的价值。

**关键词:**草鱼鱼皮,明胶,可得然胶,流变特性

## Rheological properties and interactional mechanism of grass carp skin gelatin and curdlan co-gels mixed systems

CAI Lu-yun<sup>1,2</sup>, FENG Jian-hui<sup>1</sup>, NIE Xiao-hua<sup>3</sup>, LI Jian-rong<sup>1,2,\*</sup>, ZHAO Wei<sup>4</sup>, SHEN Lin<sup>5</sup>

(1. College of Food Science and Engineering of Bohai University, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Food Safety Key Lab of Liaoning Province, Jinzhou 121013, China;

2. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. College of Ocean, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

4. Dalian Tianbao Green Foods Co., Ltd, Dalian 116001, China;

5. Dalian Donglin Food Co., Ltd, Dalian 116007, China)

**Abstract:** In this paper, the interaction of gelatin and curdlan was studied by measuring the particle size, rheological properties and FTIR. Gelatin was obtained from the skin of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). It was found that the particle size of gelatin-curdlan col-gel system changed with the concentration of curdlan, when the concentration was 0.5%, the particle size could reach to 1203.8 nm, almost 4 times of the molecular diameter of fish gelatin. Dynamic rheology showed that the co-gels mixed system had higher storage modulus (G') and the loss modulus (G'') and performed a superior viscoelastic property. In addition, the concentration of curdlan had a greater influence on the viscosity of the system in the low frequency region, had a greater influence on the elastic while in the high frequency region. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy suggested the interaction between curdlan and gelatin. In short, adding curdlan can improve the stability of fish gelatin which provided a certain value for extensive application of fish gelatin.

**Key words:** grass carp; gelatin; curdlan; rheological property

中图分类号:TS254.4

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2017)01-0049-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2017.01.001

收稿日期:2016-06-06

作者简介:蔡路昀(1981-),男,博士,副教授,研究方向:海洋食品化学与功能食品,E-mail:clyun2007@163.com。

\* 通讯作者:励建荣(1964-),男,博士,教授,主要从事水产品和果蔬贮藏加工及安全方面的研究,E-mail:lijr6491@163.com。

基金项目:国家自然科学基金(31401478);国家博士后基金面上项目(2015M570760);辽宁省科技攻关项目(2015103020);重庆市博士后特别资助项目(Xm2015021)。

明胶是胶原蛋白的部分变性产物,主要存在于动物体的皮肤、骨骼和结缔组织中。明胶因其良好的生物相容性、易降解性、弱抗原性,被广泛应用于食品、医药、化妆品等行业中<sup>[1]</sup>。明胶主要作为增稠剂、起泡剂和稳定剂被应用到糖果和甜点等食品中<sup>[2]</sup>。全世界对明胶的需求量巨大,并且呈现逐年递增的趋势<sup>[3]</sup>。我国传统生产的食用明胶主要来源于哺乳动物牛和猪的皮肤及骨骼,但是近年来疯牛病(BSE)和口蹄病(FMD)的爆发,以及宗教信仰和素食主义者的反对引起了人们对陆源明胶的担忧,国内外研究学者期望利用水产源明胶代替哺乳动物明胶<sup>[4-6]</sup>。

草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)是我国淡水鱼人工养殖量最大的品种之一。草鱼在生产加工中会产生大量的鱼皮、鱼骨、鱼鳞等副产物,其含量约占总重量的40%~50%<sup>[7]</sup>。利用草鱼副产物鱼皮提取明胶不仅避免了资源浪费,提升了经济价值,而且也减少了环境污染,符合“绿色”、“环保”理念。但是,相对于陆源明胶,鱼皮明胶中脯氨酸和羟脯氨酸的含量偏低,导致明胶产品的凝胶强度和粘弹性受到限制<sup>[8-9]</sup>,因此通过共混凝胶的协同增效作用来改善明胶的流变性质,是一种有效的方法。

可得然胶是一种新型的微生物多糖胶<sup>[10]</sup>,其具有以下优越的特性:(1)稳定性,为凝胶类食品提供热稳定性和冷冻-解冻稳定性;(2)凝胶性,在一定加工条件下,能形成可逆凝胶和不可逆凝胶,因此目前可得然胶作为食品添加剂被广泛使用。在食品工业中,明胶和可得然胶被广泛应用在冷冻食品或果冻甜点中,但对两者混合后溶液体系的流变特性及是否具有协同效应仍不明确。本文主要研究了总质量分数5%的明胶与不同比例可得然胶复配混合体系的流变特性及协同效应,研究不同浓度的可得然胶对体系流变性的影响及作用机理,为明胶与可得然胶复配胶体在食品工业上的广泛应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

草鱼皮明胶,实验室自制;可得然胶,食品级,中国山东中科生物公司;其他试剂均为分析纯,购于锦州国药器化玻有限公司。

PL602-L电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;Biofuge Stratos台式高速冷冻离心机 美国 Thermo 公司;IKA-T25均质机 德国 IKA 公司;Free Zone 2.5 真空冷冻干燥机 美国 Labconco 公司;超声波清洗器 上海科导超声仪器有限公司;Milli-Q 超纯水系统 美国 Millipore 公司;QWWJ-200全无油静音空压机 上海曲晨机电技术有限公司;BT-9300ST 激光粒度分布仪 丹东市百特仪器有限公司;DISCOVERY HR-1 流变仪 美国 TA 公司;Scimitar 2000 傅里叶变换红外光谱仪 美国安捷伦公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 草鱼皮原材料的预处理 购于当地水产市场

的草鱼皮经自来水冲洗三次去除污迹,剪成2 cm×2 cm的小块,在50 °C的水浴中漂烫1 min,以除去非胶原蛋白物质等杂质。经4%的NaCl浸泡1 h,去除盐溶性蛋白,之后置于正丁醇溶液中浸泡2 h,去除脂溶性杂质,将鱼皮经蒸馏水冲洗干净后真空冷冻干燥,塑封后冰箱冷冻保藏(-20 °C)以备提取。

**1.2.2 草鱼皮明胶的提取** 鱼皮明胶的提取参照Cai等<sup>[11]</sup>的方法并有稍许改动,具体操作如下:取预处理干燥后的鱼皮20 g,加入0.1 mol/L的NaOH溶液60 mL,在4 °C下磁力搅拌4 h,其中每小时更换浸泡液一次来去除可溶性蛋白和色素杂质,同时破坏胶原蛋白的化学交联键,使螺旋体结构解体或松散,水洗至中性后加入0.1 mol/L HCl 60 mL浸泡,疏松鱼皮组织使其继续溶胀,同时除去矿物质,此时鱼皮颜色呈现亮白色,后经蒸馏水洗至中性,置于60 °C的恒温水浴锅中提胶,经100目纱布过滤取上清液,浓缩胶液,冷冻干燥,得到明胶粉末。

**1.2.3 可得然胶-明胶体系样品的制备** 以去离子水为溶剂,称取5%明胶溶解于溶剂中,在室温下溶胀过夜,充分溶解。分别称取干基质量浓度为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%的可得然胶,边搅拌边缓慢添加至明胶溶液中,在室温下磁力搅拌使胶体分散均匀,经均质机均质2 min后,置于65 °C水浴中凝胶30 min,制成可得然胶-明胶混合体系的样品。

**1.2.4 可得然胶-明胶体系粒径的测定** 粒径的测定方法参照Sarbon等<sup>[12]</sup>的方法,并略作修改。将上述制备好的样品用激光粒度分布仪测定粒径的大小,样品进行三次重复,得到的平均值即为粒径值。

#### 1.2.5 可得然胶-明胶体系流变性的测定

**1.2.5.1 动态黏弹性温度扫描** 动态黏弹性温度扫描的方法参照Cho等<sup>[13]</sup>的方法,并略作修改。将液体样品加到流变仪的样品台上,盖上密封盖板,为避免在测试过程中凝胶样品发生脱水的现象,用低粘度的硅油液封明胶-可得然胶体系表层。采用直径为50 mm的平行板测量系统,将样品平衡10 min,由35 °C以1 °C/min的速度降至5 °C,平衡10 min,再以1 °C/min的速度升至35 °C,频率为1 Hz,应变是1%,平衡间距为1 mm的条件下测定升温和降温过程中储能模量(G')和损耗模量(G'')随温度的变化。

**1.2.5.2 动态黏弹性频率扫描** 动态黏弹性频率扫描的方法参照李博等<sup>[14]</sup>和Chandra等<sup>[15]</sup>的方法,并略做修改。将样品置于流变仪上,平板直径50 mm,平衡间距1 mm,固定应变为1%,测定频率由0.1 Hz上升至200 Hz,测定频率变化过程中样品储能模量(G')和损耗模量(G'')的变化。

**1.2.6 可得然胶-明胶体系傅里叶红外光谱扫描** 傅里叶变换红外光谱扫描参照Kuan等<sup>[16]</sup>的方法并略作修改。将不同浓度的可得然胶与鱼皮明胶混合后,置于4 °C冰箱中成熟18 h后,冷冻干燥,制得混合胶体粉末。将干燥后的KBr(100 mg)与冻干样品(1 mg)置于玛瑙研钵中,研磨成粉末状后,加入压片机手动压片,放到样品室扫描。设置扫描波数

范围为 4000~400  $\text{cm}^{-1}$ , 分辨率为 2  $\text{cm}^{-1}$ 。

1.2.7 数据处理 采用 Excel 2003 和 Origin 8.5 软件对数据进行处理分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 明胶-可得然胶体系粒径的测定

鱼皮明胶溶液的分子粒径约为 276 nm, 由图 1 可以看出, 加入可得然胶后, 混合体系的粒径逐渐增大, 可得然胶浓度为 0.5% 时, 粒径最大为 1203.8 nm, 粒径增加了近 4 倍, 表明可得然胶与鱼皮明胶发生了共混凝胶现象, 随着可得然胶浓度的增加, 其与鱼皮明胶接触后吸附的可能性就越大, 吸附量越高。出现这种现象的原因可能由于鱼皮明胶形成的空间网状结构将可得然胶包裹, 同时混合体中多余的鱼皮明胶互相发生交联反应, 使得胶体粒径随可得然胶浓度的增加而增大。

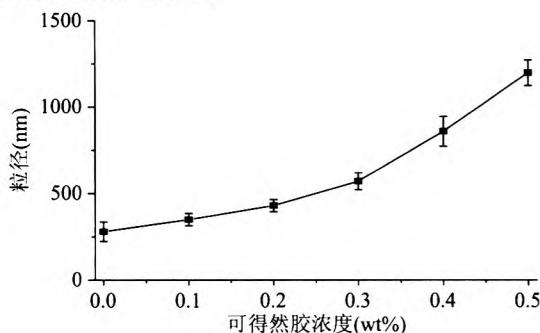


图 1 可得然胶浓度对明胶-可得然胶体系粒径的影响

Fig.1 The effects of different curdlan concentrations on fish gelatin micelle diameter

### 2.2 可得然胶浓度对明胶的流变特性影响

#### 2.2.1 动态黏弹性温度扫描测定 图 2 表示不同浓

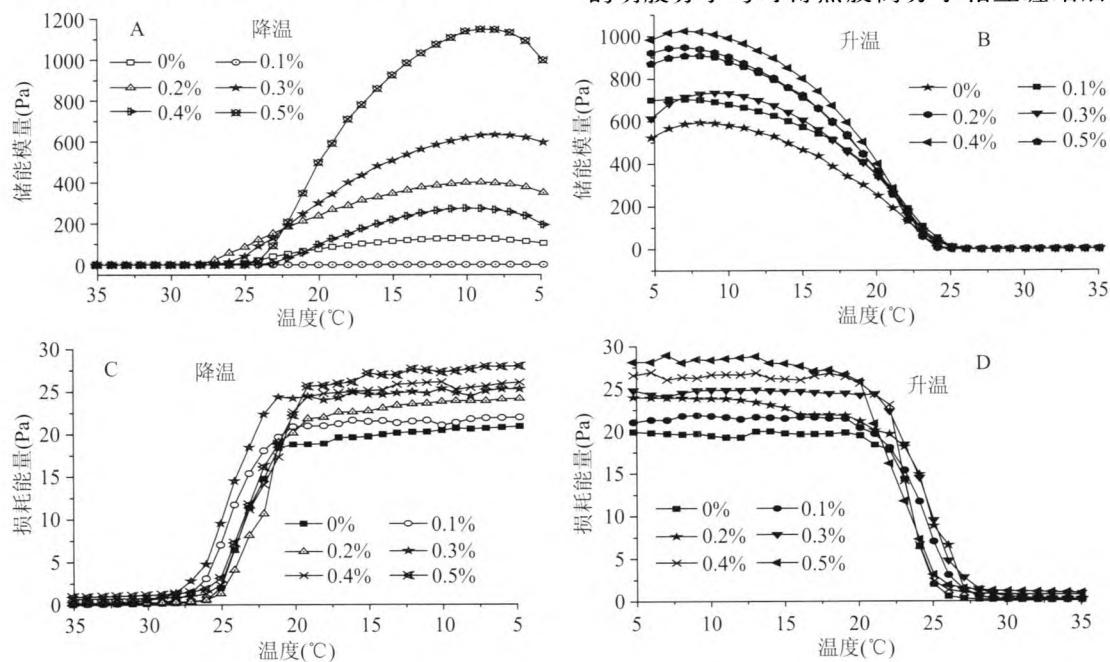


图 2 不同浓度的可得然胶在降温升温和升温过程中对体系粘弹性的影响

Fig.2 The effect of concentration of curdlan on the viscoelastic properties of gelatin and curdlan co-gels mixed systems in the process of cooling and heating

注: 降温: 35  $^{\circ}\text{C}$  平衡 10 min, 35  $\rightarrow$  5  $^{\circ}\text{C}$ /(1  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ); 升温: 5  $^{\circ}\text{C}$  平衡 10 min, 10  $\rightarrow$  25  $^{\circ}\text{C}$ /(1  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )。

度的可得然胶对草鱼皮明胶溶液的贮能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )随温度扫描的变化。A 图为在降温过程中, 随温度的改变储能模量( $G'$ )的变化; B 图为在升温过程中, 随温度的改变储能模量( $G'$ )的变化; C 图为在降温过程中, 随温度的改变损耗模量( $G''$ )的变化; D 图为在升温过程中, 随温度的改变损耗模量( $G''$ )的变化。在温度逐渐升高或降低过程中, 共混体系储能模量和损耗模量的变化反应了体系内部分子结构的变化。

从图 2 中可以看出, 在整个温度测试区域内, 共混体系的  $G'$  和  $G''$  与单体鱼皮明胶溶液相比, 可得然胶的添加量能明显增加混合体系的粘弹性, 因此两者的共混体系之间存在协同增效作用。从图 2A 和图 2C 对比以及图 2B 和图 2D 对比可以看出, 共混体系的  $G'$  始终远远大于  $G''$ , 体系以弹性为主, 且这一性质不受可得然胶与草鱼皮明胶配比的影响。在初始温度时, 明胶-可得然胶体系的粘弹性变化不大, 后期随着温度的变化, 共混体系的  $G'$  和  $G''$  均出现突变现象, 而经过突变温度区域之后, 两者都基本保持不变, 说明在升温和降温过程中存在溶胶-凝胶状态的转化。

从图 2A 和图 2C 中可看出, 随着温度的下降, 溶液的贮能模量和损耗模量同时上升, 说明体系随温度的下降开始由液体状态转化成固体状态, 同时观察到当温度低于 20  $^{\circ}\text{C}$  时, 温度扫描区域的  $G'$  呈迅速上升趋势, 说明在 25  $^{\circ}\text{C}$  附近为明胶-可得然胶混合体系的凝胶温度, 体系开始由溶胶状态转变为凝胶状态, 并且观察到随着可得然胶添加量的增大, 混合体系的凝胶温度逐渐升高, 说明在高浓度下形成了更多的交联区域, 使体系更趋于稳定<sup>[17-18]</sup>, 当纤维状的明胶分子与可得然胶高分子相互缠结后, 通过分

子间键结合,溶剂水分子被包裹在网络结构中,不能自由流动,全体失去流动性质,同时得到稳定的三维立体网络结构<sup>19</sup>。

在图2B和图2D中,随着温度的上升,复配体系的网络结构逐渐溃散,因此贮能模量和损耗模量同时下降,说明溶液开始由固体向液体状态转化,同时观察到当温度低于15℃,温度扫描区域的G'呈迅速下降趋势,当温度达到一定值以上时,G'几乎将为0,此时共混体系的三维结构被完全破坏,说明在15℃附近为明胶-可得然胶混合体系的溶胶温度,体系开始由凝胶状态转变为溶胶状态,同时随着可得然胶添加量的增加,混合体系的溶胶温度升高,在高浓度下形成的更多的交联区域,使得体系趋于稳定,破坏纤维状空间结构时需要消耗更高的能量,说明添加可得然胶不仅能提高共混体系的粘弹性和凝胶温度,同时也增加了共混体系的熔点,扩展了凝胶成型后的使用温度范围,有利于草鱼皮明胶的加工塑型。

总之,鱼皮明胶与可得然胶之间的共混凝胶对体系的粘弹性有协同增效作用,而且鱼皮明胶-可得然胶的粘弹性强烈依赖于环境中的温度。另外可得然胶的添加量能改善体系的溶胶温度和凝胶温度,改善草鱼皮明胶的稳定性,对鱼皮明胶的广泛应用具有一定的价值。

**2.2.2 动态频率扫描测定** 添加不同浓度的可得然胶对草鱼皮明胶-可得然胶共混体系的G'和G"的频率扫描图谱如图3所示。对凝胶体施加一个扭摆力矩,使胶体分子在此力矩下发生运动。当扭摆力矩的频率从低到高变化时,分子链的运动也会发生相应的改变,测定其黏弹性能。G'反映明胶-可得然胶体系分子随外力的改变而发生形变的能力;G"反映体系分子随外力的改变分子链内或分子间拉伸导致的能量损耗<sup>20</sup>。

由图3可以看出,在频率测试范围内,可得然胶-鱼皮明胶共混体系的储能模量G'和损耗模量G"同单体鱼皮明胶相比,添加可得然胶能明显增加混合体系的粘弹性,尤其当可得然胶的添加量为0.5%时,体系的G'增加了近两倍,而且G"也有所增加,说明两者的共混体系之间存在协同增效作用。明胶分子与可得然胶分子间相互作用,使得三维网状结构重新组合,而且当可得然胶的浓度不断增加,会使得三维网状结构更加致密有序,从而增加了体系的凝胶弹性<sup>21</sup>。

在整个频率扫描过程中,体系的贮能模量G'远大于损耗模量G",体系以弹性为主,且这一性质不受可得然胶与草鱼皮明胶配比的影响。同时可以看出,G'和G"具有明显的频率依赖性。在低频率时,明胶-可得然胶共混体系的G"变化很大,G'略有变化,说明低频时对体系的粘性影响较大;随着频率的增加,共混体系G'有明显增大趋势,而G"基本保持不变,说明高频时对体系的弹性影响较大。在相同的震荡频率下,高浓度的可得然胶体系频率的斜率较小,说明其在给定的剪切频率的范围内,具有较高的凝胶稳定性,说明添加可得然胶,可以增加可得然胶-鱼皮明胶共混体系的稳定性。

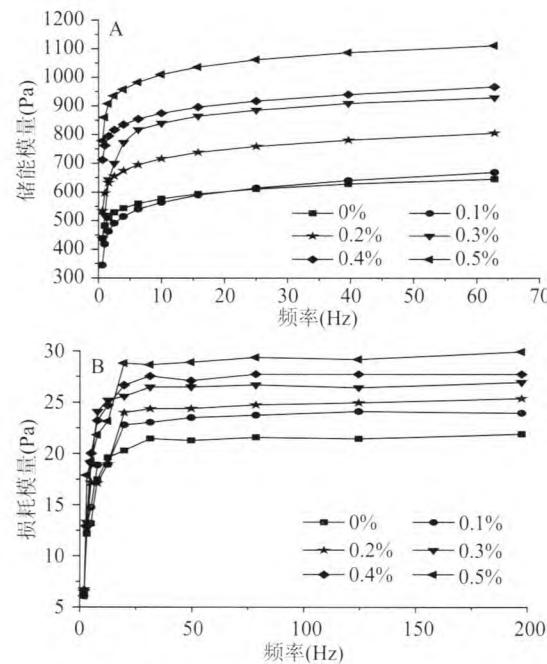


图3 不同浓度的可得然胶频率扫描过程中对体系粘弹性的影响

Fig.3 Changes in dynamic storage modulus

and loss modulus for each of the curdlan

concentrations on gelatin and curdlan co-gels mixed systems

## 2.3 红外光谱检测结果

不同浓度的可得然胶与鱼皮明胶的红外光谱如图4所示,光谱峰值和归属如表1所示。由图4可以看出,不同浓度的可得然胶与鱼皮明胶混合后,红外光谱图的趋势基本相同,这说明这几种体系的结构很相似。

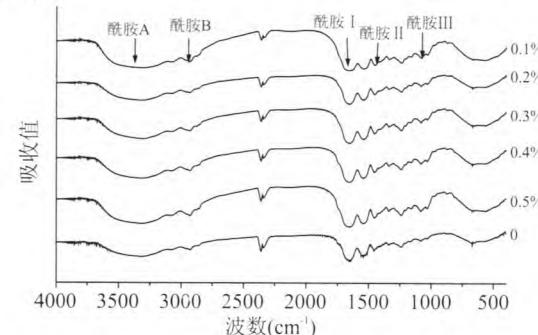


图4 明胶-可得然胶体系红外扫描图

Fig.4 FTIR spectrum of gelatin-curdlan

co-gels with different curdlan concentrations

红外光谱图中每一个吸收峰的位置与强度同分子中的官能团或原子的振动情况相对应<sup>22</sup>,光谱图中出现了酰胺A、酰胺B、酰胺I、酰胺II、酰胺III的吸收峰。酰胺A的吸收峰一般在3400~3440 cm<sup>-1</sup>处,当存在与氢键形成缔合的N-H肽段,吸收峰向低波数移动<sup>23</sup>。红外图谱中五种浓度的可得然胶添加量以及空白组的酰胺A的吸收峰均小于3400 cm<sup>-1</sup>,说明体系中均存在氢键,但是复配体系中氢键的数量更多,即分子间的相互作用一定增大。对单体鱼皮明胶和0.2%可得然胶-鱼皮明胶共混体进行FTIR谱图分析可知,伸缩振动峰由3393 cm<sup>-1</sup>向低波数

表1 明胶-可得然胶体系红外光谱峰位置和振动归属

Table 1 Peak position and analysis of mixtures with different curdlan concentrations of col-gels

结构	波数( $\text{cm}^{-1}$ )						解析
	0%	0.1%	0.2%	0.3%	0.4%	0.5%	
酰胺 A	3393	3348	3318	3286	3331	3375	N-H 和氢键伸缩振动
酰胺 B	2928	2932	2932	2932	2930	2930	CH <sub>2</sub> -不对称伸缩振动
酰胺 I	1657	1638	1647	1651	1668	1647	C=O 伸缩振动或 $\alpha$ -螺旋的 COO- 反对称收缩振动
酰胺 II	1458	1450	1450	1450	1445	1456	N-H 弯曲与 C-N 伸缩
酰胺 III	1240	1238	1240	1238	1229	1238	N-H 弯曲振动 C-N 伸缩振动

3318  $\text{cm}^{-1}$  偏移, 这是可得然胶与鱼皮明胶相互作用的结果, 分子间形成氢键所致<sup>[24]</sup>。系酰胺 B 的吸收峰在 2922~2940  $\text{cm}^{-1}$  处出现<sup>[25]</sup>, 在复配体系内吸收峰均在 2930  $\text{cm}^{-1}$  附近波动, 亚甲基基团会发生不对称的伸缩振动。酰胺 I 的吸收峰一般在 1600~1700  $\text{cm}^{-1}$  处, 酰胺 I 带与 C=O 伸缩振动或  $\alpha$ -螺旋的 COO- 反对称收缩振动相关, 由图中可以看到酰胺 I 带吸收峰位置逐渐向低波数移动, 反映了明胶-可得然胶体系中结构发生转化。酰胺 I 和酰胺 III 是蛋白质分子二级结构的特征区域<sup>[22]</sup>, 图谱中的吸收峰发生偏移, 说明分子间存在相互作用。由此可见, 添加可得然胶, 使得可得然胶-鱼皮明胶共混体系的 FTIR 特征峰发生改变, 表明共混体系的结构构象发生了较大变化, 两者之间形成了具有相互作用的复合凝胶体系。

### 3 结论

本文以糖果甜点等食品中常用的食品添加剂鱼皮明胶-可得然胶体系为研究对象, 通过其粒径的变化趋势明确两者之间发生了相互作用; 流变学测试表明, 共混体系所呈现的流变学特性与凝胶特性是由于鱼皮明胶与可得然胶分子间产生了相互作用力, 表现出更强的贮能模量 G' 和损耗模量 G'', 进而产生协同增效作用; 通过红外光谱扫描图确定添加不同浓度的可得然胶反应前后二级结构的变化进一步证明了鱼皮明胶与可得然胶分子间发生了交联反应, 揭示了两者之间相互作用机理。

### 参考文献

- [1] Liu D, Nikoo M, Boran G, et al. Collagen and gelatin [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6: 527~557.
- [2] Koli J M, Basu S, Nayak B B, et al. Improvement of gel strength and melting point of fish gelatin by addition of coenhancers using response surface methodology [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(6): E503~E509.
- [3] Jeevithan E, Qingbo Z, Bao B, et al. Biomedical and pharmaceutical application of fish collagen and gelatin [J]. Journal of Nutritional Therapeutics, 2013, 2(4): 218~227.
- [4] Karim A A, Bhat R. Fish gelatin: properties, challenges, and prospects as an alternative to mammalian gelatins [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 563~576.
- [5] Anvari M, Chung D. Dynamic rheological and structural characterization of fish gelatin-Gum arabic coacervate gels cross-linked by tannic acid [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 516~524.
- [6] 郑海旭, 李八方, 侯虎, 等. 白鮰鱼皮明胶提取过程中脱脂工艺的优化 [J]. 食品科技, 2016, 41(01): 229~233.
- [7] 龚钢明, 顾慧, 蔡宝国. 鱼类加工下脚料的资源化与利用途径 [J]. 中国资源综合利用, 2003, 35(7): 23~24.
- [8] Karim A A, Bhat R. Fish gelatin: properties, challenges, and prospects as an alternative to mammalian gelatins [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 563~576.
- [9] da Silva R S G, Pinto L A A. Physical cross-linkers: alternatives to improve the mechanical properties of fish gelatin [J]. Food Engineering Reviews, 2012, 4(3): 165~170.
- [10] 肖素荣, 高清山, 李京东. 新型食品添加剂可得然胶的性质及应用 [J]. 中国食物与营养, 2008, 28(01): 25~26.
- [11] Cai L, Wu X, Lv Y, et al. The neuroprotective and antioxidant activities of protein hydrolysates from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) skin [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(6): 3750~3755.
- [12] Sarbon N M, Badii F, Howell N K. The effect of chicken skin gelatin and whey protein interactions on rheological and thermal properties [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 83~92.
- [13] Cho S M, Gu Y S, Kim S B. Extracting optimization and physical properties of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) skin gelatin compared to mammalian gelatins [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(2): 221~229.
- [14] 李博, 邵自强, 廖兵. HEC/CMC 复配溶液协同效应的流变学研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(02): 226~230.
- [15] Chandra M V, Shamasundar B A. Rheological properties of gelatin prepared from the swim bladders of freshwater fish Catla catla [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 48: 47~54.
- [16] Kuan Y H, Nafchi A M, Huda N, et al. Effects of sugars on the gelation kinetics and texture of duck feet gelatin [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 58: 267~275.
- [17] 何强, 江波. 黄原胶和瓜尔豆胶的复配稳定剂对冰淇淋品质和流变性的影响 [J]. 无锡轻工大学学报, 2004, 23(03): 46~50.
- [18] Du L, Brenner T, Xie J, et al. A study on phase separation behavior in kappa/iota carrageenan mixtures by micro DSC, rheological measurements and simulating water and cations migration between phases [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 55: 81~88.
- [19] Sarbon N M, Badii F, Howell N K. Preparation and characterisation of chicken skin gelatin as an alternative to mammalian gelatin [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30 (1): (下转第 64 页)

2010,58(15):8604-8611.

[12] Baydoun L, Furrer P, Gurny R, et al. New surface-active polymers for ophthalmic formulations: evaluation of ocular tolerance [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2004, 58(1):169-175.

[13] Chu B-S, Ichikawa S, Kanafusa S, et al. Preparation of Protein-Stabilized  $\beta$ -Carotene Nanodispersions by Emulsification-Evaporation Method [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2007, 84(11):1053-1062.

[14] 朱卫红, 许时婴, 江波. 微胶囊壁材辛烯基琥珀酸酯化淀粉的界面性质和乳化稳定性 [J]. 食品科学, 2006(12):79-84.

[15] Varona S, Martín Á, Caceres M J. Formulation of a natural biocide based on lavandin essential oil by emulsification using modified starches [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(6):1121-1128.

[16] Zeeb B, Gibis M, Fischer L, et al. Influence of interfacial properties on Ostwald ripening in crosslinked multilayered oil-in-

(上接第 53 页)

143-151.

[20] 熊文飞, 陈日春, 蔡楠, 等. 鲢鱼鱼鳞胶原蛋白的流变特性 [J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(01):69-72.

[21] Aparicio-Sagüilán A, Méndez-Montealvo G, Solorza-Feria J, et al. Thermal and viscoelastic properties of starch gels from maize varieties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(7):1078-1086.

[22] 李越, 刘志伟, 张国秀, 等. 鲢鱼皮、鱼鳞胶原的制备及理化特性的研究 [J]. 现代食品科技, 2016, 32(03):232-238.

[23] Muyonga J H, Cole C G B, Duodu K G. Fourier transform

(上接第 58 页)

[17] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用 [J]. 实验科学与技术, 2007, 5(2):1-4.

[18] Danaé Larsen, Siew-Young Quek, Laurence Eyres. Evaluating instrumental color and texture of thermally treated New Zealand King Salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) and their relation to sensory properties [J]. Food Science and Technology, 2011(44):1814-1820.

[19] 王松磊, 贺晓光, 赵大鹏. 基于介电特性的羊肉品质无损检测 [J]. 宁夏工程技术, 2013, 12(1):30-34.

[20] Shirsat N, Lyng, J G, Brunton, N P, et al. Ohmic processing: Electrical conductivities of pork cuts [J]. Meat Science, 2004, 67:

-water emulsions. [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 387(1):65-73.

[17] Solans C, Izquierdo P., Nolla J, et al. Nano-emulsions [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2005, 10(3~4): 102-110.

[18] 陈翰.  $\beta$ -胡萝卜素纳米乳液的制备及其消化特性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2015.

[19] Lin B, Lei Y, Arun K B, et al. Carbohydrate nanoparticle-mediated colloidal assembly for prolonged efficacy of bacteriocin against food pathogen [J]. Biotechnology and bioengineering, 2011, 108(7):1529-1536.

[20] Yuan Y, Gao Y X, Zhao J, et al. Characterization and stability evaluation of  $\beta$ -carotene nanoemulsions prepared by high pressure homogenization under various emulsifying conditions [J]. Food Research International, 2008, 41(1):61-68.

[21] 陈风平. 低能化纳米乳的制备及作为虾青素运送体系的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

infrared(FTIR) spectroscopic study of acid soluble collagen and gelatin from skins and bones of young and adult Nile perch (*Lates niloticus*) [J]. Food Chemistry, 2004, 86(3):325-332.

[24] 卢伟丽. 卡拉胶和褐藻胶流变学特性及凝胶特性的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

[25] Kittiphananabawon P, Benjakul S, Visessanguan W, et al. Comparative study on characteristics of gelatin from the skins of brownbanded bamboo shark and blacktip shark as affected by extraction conditions [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(2): 164-171.

507-514.

[21] Yildiz-Turp G, Sengun I Y, Kendirci P, et al. Effect of ohmic treatment on quality characteristic of meat: A review [J]. Meat Science, 2013, 93, 441-448.

[22] McKenna B M, Lying J, Brunton N, et al. Advances in radio frequency and ohmic heating of meats [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77, 215-229.

[23] Yinzhe Jin, Yu-dong Cheng, Mika Fukuoka, et al. Electrical conductivity of Yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) fillets during ohmic heating [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(9): 1904-1913.

权威·核心·领先·实用·全面