

提取 pH 对鳙鱼鱼鳞明胶功能性质的影响

Effect of pH value in preparation process on functional properties of gelatin from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) scale

沙小梅^{1,2} 涂宗财^{1,2,3} 王 辉³ 张 露^{1,2} 黄 涛³ 胡娑娑^{1,2}
SHA Xiao-mei^{1,2} TU Zong-cai^{1,2,3} WANG Hui³ ZHANG Lu^{1,2} HUANG Tao³ HU Zi-zi^{1,2}

(1. 江西师范大学功能有机小分子教育部重点实验室, 江西 南昌 330022; 2. 江西师范大学生命科学学院, 江西 南昌 330022; 3. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047)

(1. Key Laboratory of Functional Small Organic Molecule, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China; 2. College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China; 3. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China)

摘要:研究了制备过程中 pH 值(3.0~7.0)对鳙鱼鱼鳞明胶组成、得率和功能性质(凝胶强度、胶融温度和浊度)的影响,并对鱼鳞明胶的分子量分布进行了探究。结果表明,pH 值在 3.0~7.0 时均能得到高品质的鱼鳞明胶(高蛋白质含量、低灰分含量)。随着 pH 值的增加,鳙鱼鱼鳞明胶得率逐渐降低,浊度逐渐增加,凝胶强度和胶融温度先增加后减小。此外,鳙鱼鱼鳞明胶的凝胶强度与分子量分布具有一定的相关性。上述研究结果可为特定用途的鱼明胶制备提供技术支持。

关键词:鳙鱼;鱼鳞明胶;得率;凝胶强度;胶融温度;浊度;分子量分布

Abstract: The effect of pH value in preparation process on proximate composition, yield and functional properties including gel strength, melting temperature and turbidity of gelatin from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) scale was investigated. Moreover, sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) was used to evaluate the change of molecular weight distribution for fish gelatin. The results indicated that regardless of pH values in the range of 3.0~7.0 for preparation process, fish gelatin had a high quality with high protein content and low ash content. With pH value increasing, the yield of fish gelatin gradually decreased, however, turbidity showed an increased trend. When pH value increased from 3.0 to 7.0, gel strength and melting temperature of fish gelatin in-

creased at first, and then decreased. In addition, gel strength of gelatin from bighead carp scale was related to molecular weight distribution in some extent. Above results in this study could give some technical support in the preparation of fish gelatin with special application.

Keywords: gelatin from bighead carp scale; yield; gel strength; melting temperature; turbidity; molecular weight distribution

因具有良好的凝胶特性和普通蛋白所呈现的功能性质,明胶被广泛应用于食品、制药、生物医学、照相和化妆品行业^[1]。目前,商业明胶主要来源于哺乳动物,如猪皮和牛皮^[2]。由于疯牛病和宗教信仰等因素,哺乳动物明胶的应用受到一定限制,许多科研工作者^[3-5]已经致力于开发哺乳动物明胶替代物。因具有与哺乳动物明胶类似的功能性质,鱼明胶成为颇具前景的哺乳动物明胶替代物^[6-7]。另外,制备鱼明胶的原料主要来源于鱼加工过程中产生的副产物(如鱼皮、鱼鳞等),因此,鱼明胶具有价格低廉的优势^[8]。

鱼鳞是鱼制品加工过程中产生的主要废弃物之一,约占鱼体重量的 2%。近些年,利用鱼鳞制备明胶的研究报道日益增多,主要集中在鱼鳞脱钙^[9]、预处理^[10]和制备工艺^[11]等方面。在鱼鳞明胶制备方面,Wangtueai 等^[11]优化了狗母鱼鱼鳞明胶的制备工艺(包括 NaOH 浓度、预处理时间、制备温度、制备时间);Le 等^[12]研究了制备温度和时间对竹荚鱼鱼鳞明胶得率和膜特性的影响;课题组^[13]前期研究了超声波辅助提取对鳙鱼鱼鳞明胶得率和凝胶性能的影响。然而,迄今为止,研究制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶功能性质影响的报道并不多,且未见系统研究 pH 值对鳙鱼鱼鳞明胶功能性质影响的相关报道。

鳙鱼(*Hypophthalmichthys nobilis*)是一种产自亚洲的淡水鱼,广泛分布于湖泊和河流中。鳙鱼已经被引入位于欧

基金项目:国家自然科学基金(编号:31660487);江西省重点研发计划项目(编号:20161BBF60096);江西省现代农业产业技术体系建设专项(编号:JXARS-03);江西省教育厅科学技术研究项目(编号:GJJ150303)

作者简介:沙小梅,女,江西师范大学讲师,博士。
通信作者:涂宗财(1965—),男,江西师范大学教授,博士。
E-mail: tuzc_mail@aliyun.com

收稿日期:2016-08-30

洲、南美洲和北美洲的 70 多个国家^[14]。在中国,鳙鱼与青鱼、鲢鱼和草鱼一起,并称为四大家鱼^[15]。据统计^[16],2014 年,中国鳙鱼养殖年产量达到 3.20×10^6 t。除鲜销外,鳙鱼主要被用于加工成鱼制品,产生的下脚料有待于加工利用。因此,本研究以鳙鱼鱼鳞为原料,研究制备过程中不同的 pH 值对鱼鳞明胶得率、凝胶强度、胶融温度、浊度、分子量分布等特性的影响,旨在为鳙鱼鱼鳞的高值化利用提供依据,为高品质鳙鱼鱼鳞明胶的制备提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

- 鳙鱼鱼鳞:市售;
- 蛋白分子量 Marker:分子量范围为 10~200 kDa,美国 Thermo Scientific 公司;
- 盐酸:分析纯,上海试剂一厂;
- Tris-HCl 缓冲液(pH 6.8 和 8.8):分析纯,北京索莱宝科技有限公司;
- 考马斯亮蓝 R-250:分析纯,北京索莱宝科技有限公司;
- 十二烷基硫酸钠:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;
- 其他所用试剂均属于分析纯或更高的等级。

1.2 仪器与设备

- 质构分析仪:CT3 型,美国 Brookfield 公司;
- 电泳仪:BIO-RAD 型,美国 BIO-RAD 公司;
- 程序控制高低温恒温槽:CXDC-0510 型,南京舜玛仪器设备有限公司;
- 紫外-可见分光光度计:T6 型,北京普析通用仪器有限公司;
- 凯氏定氮仪:KDY-9820 型,厦门精艺兴业科技有限公司;
- 冷冻干燥机:LJG-1 型,北京亚泰科隆仪器有限公司。

1.3 试验方法

- 1.3.1 鱼鳞的脱钙处理 将鱼鳞置于组织捣碎机中捣碎 5 min,以去除鱼鳞表面的银白色物质。接下来对鱼鳞进行脱钙处理,脱钙工艺:盐酸浓度 0.5 mol/L、料液比 1:25(g/mL)、脱钙时间 1 h。脱钙后,进一步清洗鱼鳞以去除残存的酸液,以用于下一步的鱼鳞明胶提取。
- 1.3.2 鱼鳞明胶的制备 将脱钙后的湿鱼鳞和去离子水按 1:3(g/mL)混合,用 1 mol/L 的盐酸溶液分别调 pH 值至 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0(当 pH 值高于 7.0,制备得到的鱼鳞明胶溶液易呈现白色,影响鱼鳞明胶产品的透明度,因此本试验控制鱼鳞明胶的制备 pH 值不高于 7.0;当 pH 值低于 3.0,强酸环境易促使胶原蛋白过度水解,进而影响明胶品质),置于 60 ℃的水浴锅 2 h 进行鱼鳞明胶的提取。制备结束后,过滤去除鱼鳞残渣,将滤液置于 60 ℃的旋转蒸发仪中,将滤液体积蒸发至原体积的 1/3。冻干浓缩后的鱼鳞明胶溶液,备用。
- 1.3.3 鱼鳞明胶组成成分的测定 根据 Cunniff^[17]的方法,分别测定制备过程中不同 pH 值条件下得到的鱼鳞明胶水分、灰分和蛋白质含量。

1.3.4 鱼鳞明胶得率的测定 根据 Tabarestani 等^[2],修改如下:利用双缩脉法,测定 540 nm 处的吸光值以计算提取液中的蛋白质含量。利用牛血清白蛋白作为标准蛋白,绘制蛋白质含量测定的标准曲线。鱼鳞明胶的得率按式(1)进行计算:

$$Y = \frac{c \times V}{M} \times 100\%, \tag{1}$$

- 式中:
- Y——鱼鳞明胶的得率,%;
- c——明胶提取液中的蛋白质浓度,g/mL;
- V——明胶提取液的体积,mL;
- M——脱钙后的鱼鳞干重,g。

1.3.5 鱼鳞明胶凝胶强度的测定 根据 Giménez 等^[18],修改如下:在 55 ℃水浴锅中利用去离子水溶解鱼鳞明胶制备成 66.7 g/L 的溶液,在 10 ℃下冷却 16~18 h。采用 CT3 质构分析仪以直径 1.27 cm 的平底圆柱形探头测定鱼鳞明胶的凝胶强度,测试速度为 1 mm/s。当鱼鳞明胶样品被挤压 4 mm 时产生的最大受力(g)即为凝胶强度。所测样品的直径大约为 33 mm,高度大约为 22 mm。

1.3.6 鱼鳞明胶胶融温度的测定 根据 Muyonga 等^[19],修改如下:在 55 ℃水浴锅中利用去离子水溶解鱼鳞明胶制备成 66.7 g/L 的溶液,倒入带螺帽的试管(12 mm × 100 mm),在试管顶部留出部分空间,盖上螺帽,倒置于 4 ℃冰箱 16~18 h。将装有鱼鳞明胶的试管转移至 10 ℃恒温槽,此时,试管内的空间(即不含有明胶的部分)位于试管底部。以 0.5 ℃/min 的速度提高恒温槽的温度,当试管底部的气泡开始往上运动时记录温度,即为鱼鳞明胶的胶融温度。

1.3.7 鱼鳞明胶浊度的测定 根据 Kittiphattanabawon 等^[20],修改如下:用 pH 值 5.0 的醋酸-醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L)将鱼鳞明胶配制成 66.7 g/L 的溶液,采用紫外-可见分光光度计测定 360 nm 处的吸光值用以表示鱼鳞明胶的浊度。

1.3.8 鱼鳞明胶分子量的测定 采用十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis,SDS-PAGE)测定鱼鳞明胶的分子量分布,试验方法是在 Balti 等^[3]报道的方法基础上进行微小修改而获得。浓缩胶和分离胶的浓度分别为 50,75 g/L。制备 5 mg/mL 的鱼鳞明胶样品,在 95 ℃加热 5 min,再经离心机以 $5\,000 \times g$ 的速度离心 10 min,取 10 μL 溶液上样。

1.3.9 数据的统计学分析 所有试验数据都是来源于 3 个平行样测得的结果取平均值,数据通过 SPSS 17.0 进行分析,选取 Duncan's test 用于显著性分析(P<0.05)。

2 结果与讨论

2.1 鱼鳞明胶的组成分析

由表 1 可知,鳙鱼鱼鳞明胶的水分含量为 3.88%~5.50%,蛋白质含量为 93.55%~94.75%(以湿基计),灰分含量为 0.21%~0.86%(以湿基计)。虽然不同 pH 值下制备得到的鱼鳞明胶组成稍有差别,但所有样品的蛋白质含量均高于 90%、灰分含量均低于 1%,表明提取 pH 值在 3.0~7.0 时

均能得到高蛋白质含量、低灰分含量的鱼鳞明胶。鱼鳞含有大量的无机矿物质(以羟基磷灰石为主),而本试验所有样品的灰分含量均低于 1%,主要原因在于脱钙处理去除了鱼鳞的绝大部分矿物质成分。

本研究中,鳙鱼鱼鳞明胶的蛋白质含量(93.55%~94.75%)高于枪乌贼鱼皮明胶(87.57%~89.52%)^[8]、胡子鲶鱼皮明胶(77.88%)^[21]、淡水鲨鱼鱼皮明胶(80.02%)^[21]、乌贼鱼皮明胶(91.35%)^[3]等的蛋白质含量。此外,一般情况下,食用明胶恰当的水分和灰分含量应分别低于 15%和 2%^[8, 13],本试验中不同 pH 值条件下制备的鳙鱼鱼鳞明胶水分和灰分含量均低于上述指标。以上结果表明鳙鱼鱼鳞明胶可作为一种优质的可食用明胶资源。

表 1 不同提取 pH 值下鱼鳞明胶的组成分析[†]
Table 1 The proximate composition of gelatin from fish scale in different pH values

pH 值	水分含量/%	蛋白质含量/%	灰分含量/%
3	4.31±0.15 ^{ab}	93.59±0.40 ^{ab}	0.40±0.18 ^{ab}
4	4.08±0.22 ^{ab}	94.29±0.09 ^{ab}	0.21±0.04 ^{ab}
5	4.18±0.27 ^{ab}	94.09±0.53 ^{ab}	0.53±0.06 ^{abc}
6	3.88±0.27 ^a	94.75±1.07 ^b	0.56±0.26 ^{bc}
7	5.50±0.43 ^c	93.55±0.08 ^{ab}	0.86±0.12 ^c

[†] 同一列不同字母表示存在显著性差异(P<0.05)。

2.2 提取 pH 值对鱼鳞明胶得率的影响

由图 1 可知,当 pH 值在 3.0~7.0 时,随着 pH 值的增加,鳙鱼鱼鳞明胶的得率显著性降低(P<0.05)。当 pH 值为 3.0 时,鱼鳞明胶的得率为 42.94%,而 pH 值提升至 7.0 时,鱼鳞明胶的得率则降至 27.92%。Cho 等^[22]研究了提取 pH 值(4.0~9.0)对斑鲳鱼皮明胶得率的影响,结果表明,当 pH 值为 4.0 时,鱼皮明胶的得率最高。上述结果表明,低 pH 值有利于高得率鱼明胶的制备。

蛋白质能在酸性、碱性、酶等条件下发生水解形成多肽。在明胶制备过程中,在酸性条件下,H⁺会攻击鱼鳞胶原蛋白的肽键,促使其断裂形成分子量不等的蛋白质片段,即产生具有凝胶特性的明胶。pH 值越低,能够断裂胶原蛋白肽键的 H⁺就越多,因此,鱼鳞明胶的得率越高。低 pH 值虽然有

利于胶原蛋白断裂形成明胶(即提高鱼鳞明胶的得率),但是可能会在一定程度上影响鱼鳞明胶的功能性质,因此,进一步研究了 pH 值对鱼鳞明胶功能性质(凝胶强度、胶融温度等)的影响。

2.3 提取 pH 值对鱼鳞明胶凝胶强度的影响

由图 2 可知,当 pH 值在 3.0~7.0 时,随着 pH 值的增加,鳙鱼鱼鳞明胶凝胶强度呈现先增加后降低的趋势。当 pH 值为 3.0 时,鱼鳞明胶的凝胶强度最低,为 762.41 g;当 pH 值为 4.0、5.0、6.0 时,制备得到的鱼鳞明胶凝胶强度最高,且三者间不存在显著性差异(P>0.05);而 pH 值为 7.0 时,鱼鳞明胶的凝胶强度为 831.11 g,低于 pH 值 4.0、5.0 和 6.0 条件下制备得到的鱼鳞明胶凝胶强度。相比之下,Cho 等^[22]的研究结论略有不同,其结果显示,当制备 pH 值为 6.0 和 7.0 时,斑鲳鱼皮的凝胶强度最高,产生不同试验结果的原因可能是明胶制备的原料不同,对酸碱度的耐受程度有所不同。

制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶凝胶强度的影响可能与其分子量变化情况有关,较强酸性条件下(如 pH 值为 3.0 时),胶原蛋白易降解成较低分子量的片段^[23],将影响明胶分子交联形成凝胶网络结构的能力,因此,鱼鳞明胶呈现出较低的凝胶强度。在中性条件下(如 pH 值为 7.0 时),加热降解可能是影响胶原蛋白裂解成明胶的主要因素。热处理可能会使制备得到的鱼鳞明胶呈现出较低含量的 α 链或 β 链,进而影响鱼鳞明胶的凝胶强度。不同 pH 值条件下制备得到的鱼鳞明胶样品的分子量分布情况将通过 SDS-PAGE 试验进行分析论证。

2.4 提取 pH 值对鱼鳞明胶胶融温度的影响

由图 3 可知,与 pH 值对鱼鳞明胶凝胶强度的影响趋势类似,随着 pH 值的升高,鱼鳞明胶的胶融温度先增加后减少。当 pH 值为 4.0、5.0、6.0 时,鳙鱼鱼鳞明胶的胶融温度最高,分别为 28.40、28.35、28.40 $^{\circ}\text{C}$,且三者间不存在显著性差异(P>0.05);当 pH 值为 3.0 时,鳙鱼鱼鳞明胶的胶融温度最低,为 26.95 $^{\circ}\text{C}$ 。胶融温度的主要影响因素在于氨基酸组成、 α 链/ β 链比例、分子量分布等^[13],pH 值较低的情况下造成鱼鳞明胶胶融温度较低的原因可能是酸性条件下高分子量的鱼鳞明胶组分发生降解,使得其形成凝胶网络结构的能

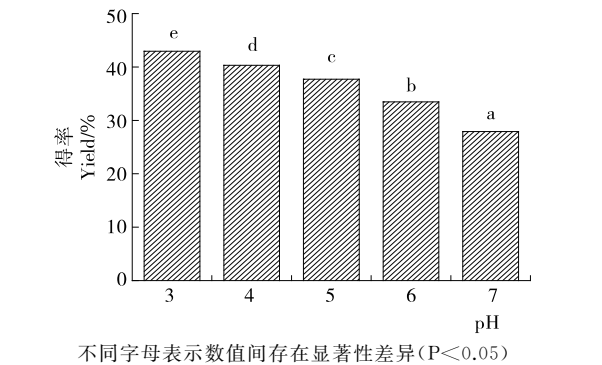


图 1 制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶得率的影响
Figure 1 The effect of pH value in preparation process on yield of gelatin from fish scale

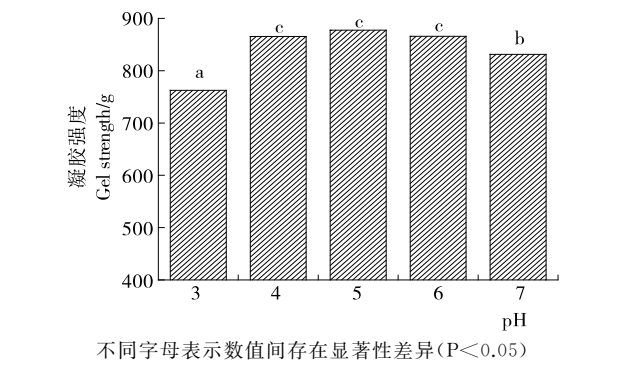
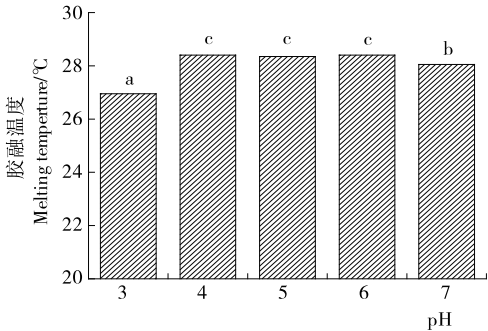


图 2 制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶凝胶强度的影响
Figure 2 The effect of pH value in preparation process on gel strength of gelatin from fish scale



不同字母表示数值间存在显著性差异($P<0.05$)

图 3 制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶胶融温度的影响

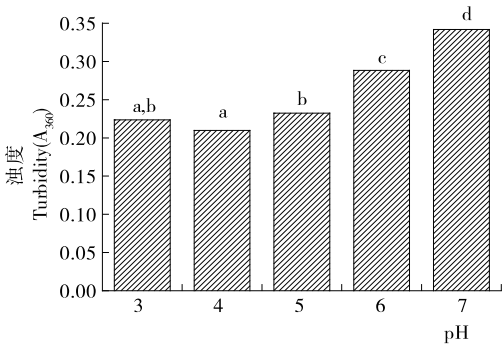
Figure 3 The effect of pH value in preparation process on melting temperature of gelatin from fish scale

力变弱,因此胶融温度降低。中性条件下得到的鱼鳞明胶胶融温度略有下降,原因可能是此条件下形成的明胶氢离子含量较少,氢键较弱,使得凝胶在较低温度下融化。胶融温度是明胶的重要特性,本试验中,鳙鱼鱼鳞明胶的胶融温度为 26.95~28.40 ℃,高于 Norziah 等^[24]报道的商业鱼明胶胶融温度(23.7~25.6 ℃),低于猪皮明胶和牛皮明胶的胶融温度(分别为 31.5,30.0 ℃)^[25]。因此,鳙鱼鱼鳞明胶可作为一种颇具应用前景的商业鱼明胶,但仍需进行一定的修饰改性才能成为哺乳动物明胶替代物。

2.5 提取 pH 值对鱼鳞明胶浊度的影响

浊度是影响明胶在食品领域应用(如明胶作为增稠剂添加于食品中)的一个重要因素^[21],高浊度会在较大程度上降低明胶的品质。由图 4 可知,随着 pH 值的升高,鳙鱼鱼鳞明胶的浊度逐渐增加。当 pH 值为 3.0 和 4.0 时,鱼鳞明胶的浊度最低,即此时鱼鳞明胶溶液的澄清度最高;当 pH 值为 7.0 时,鱼鳞明胶的浊度最高。

Kittiphattanabawon 等^[20]的研究结果表明,黑边鳍真鲨皮明胶的浊度增加与其凝胶强度降低的趋势呈现出一致性。然而,本试验中,在不同 pH 值诱导下,鳙鱼鱼鳞明胶浊度增加与其凝胶强度变化的趋势并不完全相同,表明鳙鱼鱼鳞明胶的浊度和凝胶强度之间并不存在明显的相关性。当 pH 值较高(如 pH 值为 7.0)时,鱼鳞明胶的浊度较高可能和矿



不同字母表示数值间存在显著性差异($P<0.05$)

图 4 制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶浊度的影响

Figure 4 The effect of pH value in preparation process on turbidity of gelatin from fish scale

物质(如钙离子)含量及溶解性有关。表 1 的灰分含量结果显示,提取 pH 值为 7.0 时,鱼鳞明胶的灰分含量最高,与浊度最高的结果一致。

2.6 提取 pH 值对鱼鳞明胶分子量分布的影响

课题组前期研究^[13, 26]结果表明,鳙鱼鱼鳞明胶具有典型的明胶分子量分布图,即含有清晰的 α 链条带(α_1 和 α_2)、 β 链条带(由两条 α 链共价交联形成)和高分子量聚合物(HMWP)条带。由图 5 可知,当 pH 值为 5.0 时,鱼鳞明胶呈现了典型的 α_1 链、 α_2 链、 β 链和 HMWP 条带;当 pH 值为 4.0 和 6.0 时,鱼鳞明胶仍呈现出了较为清晰的上述典型条带;然而,当 pH 值为 3.0 和 7.0 时,鱼鳞明胶的 β 链条带较为模糊,表明鱼鳞明胶中 β 链含量有所减少。此外,与其他条件相比,pH 值为 3.0 时制备得到的鱼鳞明胶呈现出了相对较浅的 α 链条带。

鱼鳞明胶的分子量分布可能会在一定程度上影响其凝胶强度。课题组^[26]前期运用硫酸铵分级沉淀法分离得到了 5 个不同凝胶强度的鱼鳞明胶组分,并对其分子量分布进行了研究,结果表明,高凝胶强度的鱼鳞明胶组分分子量较大,且含有更为明显的 α 链和 β 链条带。此外,较多的研究报道^[8, 13, 27-28]获得了同样的结论,即高分子量组分、 α 链和 β 链有助于凝胶网络的形成,进而呈现出较高的凝胶强度。在本试验中,不同 pH 值条件下制备得到的鱼鳞明胶凝胶强度和分子量分布呈现出了较为明显的相关性。pH 值为 4.0、5.0、6.0 时,制备得到的鱼鳞明胶具有较高的凝胶强度(见图 2),且呈现出清晰的 α 链、 β 链和 HMWP 条带。pH 值为 7.0 时制备得到的鱼鳞明胶虽然含有清晰的 α 链条带,但是 β 链和 HMWP 条带有所变浅,其表现出的凝胶强度也有所降低。pH 值为 3.0 时制备得到的鱼鳞明胶凝胶强度最低,同时也呈现出了最少含量的 α 链、 β 链和 HMWP 条带。

3 结论

制备过程中的 pH 值能在很大程度上影响鳙鱼鱼鳞明胶得率和功能性质,而国内外对此研究并不多见。就组成成分而言,pH 值在 3.0~7.0 时均能制备得到高品质的鱼鳞明胶,即蛋白质含量均高于 90%、灰分含量均低于 1%。当 pH 值从 3.0 增加到 7.0 时,鳙鱼鱼鳞明胶得率逐渐降低,浊度

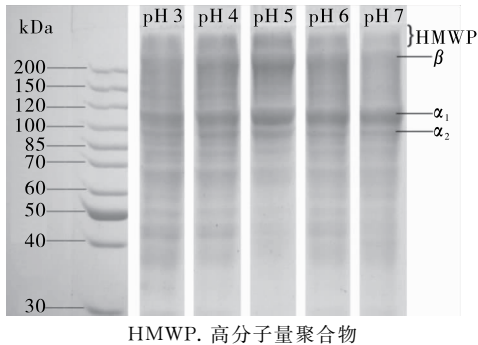


图 5 制备过程中 pH 值对鱼鳞明胶分子量的影响

Figure 5 The effect of pH value in preparation process on molecular weight distribution of gelatin from fish scale

逐渐增加,凝胶强度和胶融温度先增加后减小。因此,制备鳙鱼鱼鳞明胶时应根据其特定用途选择合适的 pH 值。例如,需获得高得率、澄清晰度较好的鱼鳞明胶时,可选择 pH 值为 3.0 进行制备。与众多的文献报道一致,本研究结果亦显示鱼明胶的凝胶强度与其分子量分布情况有关。然而,试验结果证实鳙鱼鱼鳞明胶的浊度和凝胶强度之间不存在明显的相关性。本研究的开展能为鳙鱼鱼鳞明胶的工业化生产提供一定的技术支撑。此外,课题组后续将进一步研究 pH 值对鱼鳞明胶分子结构的影响,以解析制备过程中不同 pH 值作用下鱼胶原蛋白断裂形成明胶的原理,用于指导鱼明胶的定向化制备。

参考文献

- [1] HANANI Z N, ROOS Y, KERRY J P. Use of beef, pork and fish gelatin sources in the manufacture of films and assessment of their composition and mechanical properties [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(1): 144-151.
- [2] TABARESTANI H S, MAGHSOUDLOU Y, MOTAMEDZADEGAN A, et al. Optimization of physico-chemical properties of gelatin extracted from fish skin of rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6 207-6 214.
- [3] BALTI R, JRIDI M, SILA A, et al. Extraction and functional properties of gelatin from the skin of cuttlefish (*Sepia officinalis*) using smooth hound crude acid protease-aided process [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 943-950.
- [4] GÓMEZ-GUILLÉN M C, GIMÉNEZ B, LÓPEZ-CABALLERO M E, et al. Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: A review [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(8): 1 813-1 827.
- [5] 刘丽娜, 许时婴. 斑点叉尾鲷鱼皮明胶的制备[J]. 食品与机械, 2007, 23(6): 31-34.
- [6] ETXABIDE A, URANGA J, GUERRERO P, et al. Improvement of barrier properties of fish gelatin films promoted by gelatin glycation with lactose at high temperatures [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 315-321.
- [7] HANANI Z N, ROOS Y, KERRY J. Use and application of gelatin as potential biodegradable packaging materials for food products [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 71: 94-102.
- [8] NAGARAJAN M, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Characteristics and functional properties of gelatin from splendid squid (*Loligo formosana*) skin as affected by extraction temperatures [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 389-397.
- [9] WANG Yan, REGENSTEIN J M. Effect of EDTA, HCl, and citric acid on Ca salt removal from Asian (silver) carp scales prior to gelatin extraction [J]. Journal of Food Science, 2009, 74(6): C426-C431.
- [10] ZHANG Feng-xiang, XU Shi-ying, WANG Zhang. Pre-treatment optimization and properties of gelatin from freshwater fish scales [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(3): 185-193.
- [11] WANGTUEAI S, NOOMHORM A. Processing optimization and characterization of gelatin from lizardfish (*Saurida spp.*) scales [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(4): 825-834.
- [12] LE T, MAKI H, TAKAHASHI K, et al. Properties of gelatin film from horse mackerel (*Trachurus japonicus*) scale [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(4): E734-E741.
- [13] TU Zong-cai, HUANG Tao, WANG Hui, et al. Physico-chemical properties of gelatin from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) scales by ultrasound-assisted extraction [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(4): 2 166-2 174.
- [14] LIU Da-song, LIANG Li, REGENSTEIN J M, et al. Extraction and characterisation of pepsin-solubilised collagen from fins, scales, skins, bones and swim bladders of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) [J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1 441-1 448.
- [15] WANG Ling-zhao, YANG Bao, WANG Rui, et al. Extraction of pepsin-soluble collagen from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) skin using an artificial neural network [J]. Food Chemistry, 2008, 111(3): 683-686.
- [16] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴: 2015 [Z]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 31.
- [17] CUNNIFF P. Official methods of analysis of AOAC international: Volume I agricultural chemicals, contaminants, drugs; Volume II Food composition, additives, natural contaminants [J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(11): 382-382.
- [18] GIMÉNEZ B, GÓMEZ-GUILLÉN M, MONTERO P. Storage of dried fish skins on quality characteristics of extracted gelatin [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(6): 958-963.
- [19] MUYONGA J, COLE C, DUODU K. Extraction and physico-chemical characterisation of Nile perch (*Lates niloticus*) skin and bone gelatin [J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(4): 581-592.
- [20] KITTIPIHATTANABAWON P, BENJAKUL S, VIESSAN-GUAN 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.
- [21] JAMILAH B, TAN K, HARTINA M U, et al. Gelatins from three cultured freshwater fish skins obtained by liming process [J]. Food hydrocolloids, 2011, 25(5): 1 256-1 260.
- [22] CHO S H, JAHNCKE M L, CHIN K B, et al. The effect of processing conditions on the properties of gelatin from skate (*Raja Kenojei*) skins [J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(6): 810-816.
- [23] GIMÉNEZ B, TURNAY J, LIZARBE M, et al. Use of lactic acid for extraction of fish skin gelatin [J]. Food hydrocolloids, 2005, 19(6): 941-950.
- [24] NORZIAH M, AL-HASSAN A, KHAIRULNIZAM A, et al. Characterization of fish gelatin from surimi processing wastes: Thermal analysis and effect of transglutaminase on gel properties [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(6): 1 610-1 616.

(下转第 132 页)

[9] SEPE R, ARMENTANI E, POZZI A. Development and stress behaviour of an innovative refrigerated container with pcm for fresh and frozen goods[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2015, 11(2): 202-215.

[10] 郭美茹, 周文, 周天, 等. 石墨烯/石蜡复合材料的热物理性能研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1 200-1 205.

[11] 王刚, 孙文鸽, 吴志根. 石蜡基/碳素复合相变材料的强化传热研究现状与应用[J]. 化工新型材料, 2014, 42(9): 219-222.

[12] 丁晴, 方昕, 范利武, 等. 不同二维纳米填料对复合相变材料导热系数的影响[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(3): 250-255

[13] MESALHY O, LAFDI K, ELGAFY A, et al. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (Pcm) storage using high thermal conductivity porous matrix [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(6): 847-867.

[14] 张鸿声, 汪南, 朱冬生, 等. 纳米铜粉/石蜡复合相变储能材料的性能研究[J]. 材料导报, 2011, 25(5): 173-189.

[15] 王继芬, 谢华清, 辛忠, 等. 纳米 ZnO/石蜡复合相变材料的热物理性质研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(11): 1 897-1 899.

[16] WANG Ji-fen, XIE Hua-qiang, XIN Zhong. Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes[J]. Thermochimica Acta, 2009, 488(1/2): 39-42.

[17] CUI Yang-bin, LIU Cai-hong, HU Shan, et al. The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(4): 1 208-1 212.

[18] 杨硕, 汪南, 吴淑英, 等. 纳米铝粉/石蜡复合相变储能材料的性能研究[J]. 材料导报, 2009, 23(12): 20-22.

[19] WANG Wei-long, YANG Xi-tang, FANG Yu-tang, et al. Enhanced thermal conductivity and thermal performance of form-stable composite phase change materials by using β -aluminum nitride[J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8): 1 196-1 200.

[20] ELGAFY A, LAFDI K. Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials[J]. Carbon, 2005, 43(15): 3 067-3 074.

[21] 于伟, 谢华清, 陈立飞, 等. 石墨烯制备方法及粒径对复合材料热导率的影响[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(1): 168-171.

[22] LIN Jin-shan, WANG Li-wei, CHEN Guo-hua. Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive [J]. Tribology Letters, 2010, 41(1): 209-215.

[23] FANG Xin, FAN Li-wu, DING Qing, et al. Increased thermal conductivity of eicosane-based composite phase change materials in the presence of graphene nanoplatelets[J]. Energy, 2013, 27(7): 4 041-4 047.

[24] LIN Wei, ZHANG Rong-wei, WANG C P. Modeling of thermal conductivity of graphite nanosheet composites [J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(3): 268-272.

[25] 林锦山. 石墨作为润滑油添加剂研究进展[J]. 化学工程与装备, 2010(6): 139-141.

[26] 乔玉林, 赵海朝, 臧艳, 等. 石墨烯的功能化修饰及作为润滑添加剂的应用研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(S1): 216-223.

[27] 苏睿. 石墨烯分散液的制备与应用研究进展[J]. 广东化工, 2014(8): 190-191.

[28] 赵磊蔡, 张祖川, 张旭, 等. 石墨烯作为润滑油添加剂在青铜织构表面的摩擦磨损行为[J]. 材料研究学报, 2016, 30(1): 57-62.

[29] 张杏静. 聚酯型超分散剂的合成及性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 41-53.

(上接第 16 页)

[25] KASANKALA L M, YAN Xue, YAN Wei-long, et al. Optimization of gelatine extraction from grass carp (*Catenopharyngodon idella*) fish skin by response surface methodology [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(17): 3 338-3 343.

[26] SHA Xiao-mei, TU Zong-cai, LIU Wei, et al. Effect of ammonium sulfate fractional precipitation on gel strength and characteristics of gelatin from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) scale [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 173-180.

[27] BADII F, HOWELL N K. Fish gelatin: structure, gelling properties and interaction with egg albumen proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(5): 630-640.

[28] EYSTURSKAR D J, HAUG I J, ULSET A S, et al. Mechanical properties of mammalian and fish gelatins based on their weight average molecular weight and molecular weight distribution [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2 315-2 321.

(上接第 99 页)

分析及改进设计,明确了不同结构形式对其动态特性的影响,同时获得了最佳的结构改进与动态优化方案,即采用十字筋结构时能够有效增强其抗振性能,为薄壁箱式零件的减振设计、结构改造及动力学性能优化提供了重要参考和依据,有利于食品加工机械的高速低振化设计。

参考文献

[1] 管小清, 吕志强. 工业码垛机器人动力学仿真分析与研究[J]. 食品机械, 2013, 29(1): 149-176.

[2] 陈小安, 刘俊峰, 合桦, 等. 高速电主轴热态性能及其影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 135-142.

[3] 吕冬梅, 韩江. 大型数控双柱立车立柱动力学结构分析与优化[J]. 制造技术与机床, 2015(5): 42-45.

[4] 吴玲丽, 胡小秋, 赵雁. 加工中心立柱动态特性分析与比较[J]. 机械设计与制造, 2014(3): 117-119.

[5] 杨兆军, 陈传海, 陈菲, 等. 数控机床可靠性技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 131-139.