

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190255

木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

胡爱军^{1,2}, 于辉¹, 郑捷^{1,3}, 李川¹

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;
2. 天津市宽达水产食品有限公司, 天津 300300; 3. 天津鸿腾水产科技发展有限公司, 天津 301800)

摘要: 将木薯淀粉分别以不同质量分数添加到泥鳅肌原纤维蛋白中, 采用质构仪、白度仪和扫描电镜等研究木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的硬度、弹性、保水性(WHC)、白度、微观结构的影响。结果表明: 随着淀粉添加量增大, 泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的硬度和保水性增加, 白度值降低, 弹性先增大后减少, 凝胶的致密程度增加。因此, 木薯淀粉的添加可以有效改善凝胶的性质。这为木薯淀粉的应用和泥鳅鱼糜及其制品的品质改良提供了技术支持。

关键词: 泥鳅肌原纤维蛋白; 木薯淀粉; 凝胶性质

中图分类号: TS254.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2020)04-0021-05

Effect of Cassava Starch on Gel Properties of Loach Myofibrillar Protein

HU Aijun^{1,2}, YU Hui¹, ZHENG Jie^{1,3}, LI Chuan¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Tianjin Kuanda Aquatic Food Co., Ltd., Tianjin 300300, China;
3. Tianjin Hongteng Aquatic Science & Technology Development Co., Ltd., Tianjin 301800, China)

Abstract: Different percentage of cassava starch was added to loach myofibrillar protein. The hardness, springness, water holding capacity (WHC), whiteness and microstructure of the loach myofibrillar protein gels were studied with texture analyzer, whiteness tester and scanning electron microscope. The results showed that the hardness and WHC of the loach myofibrillar protein gel increased with the increase of starch concentration, while the whiteness value decreased. The springness increased first and then decreased. The density of the gel increased gradually. Therefore, the addition of cassava starch can effectively improve the gel properties of loach myofibrillar protein. This research will provide some technical support for the application of cassava starch and the quality improvement of loach surimi and related products.

Key words: loach myofibrillar protein; cassava starch; gel properties

泥鳅在我国资源分布广阔, 常被人们称为“水中人参”, 且自古就有“天上斑鸠, 地上泥鳅”的说法。泥鳅中蛋白含量高、脂肪含量低, 而且含有大量人体所需元素、必需氨基酸及多种活性物质^[1]。泥鳅肉中蛋白质营养较完全, 肌原纤维蛋白功能性好。肌原纤维蛋白是一类具有重要生物学功能的结构蛋白质群, 其作用除了参与肌肉的收缩、影响肌肉的嫩度外, 还与肉制品的流变学特性如黏结性、保水性、弹性、质地等有着密切的关系^[2], 与水产品的品质密不可分。目前我国大部分水产加工业还是以传统

加工为主^[3], 且市场上泥鳅鱼糜深加工产品少, 同时国内外关于泥鳅肌原纤维蛋白质的研究也较少。加强肌肉中肌原纤维蛋白质的研究, 才能在加工过程中控制好影响其成胶的因素, 进而提高鱼糜制品的品质, 从而为消费者提供满意的鱼糜制品。尤其是肌原纤维冷凝胶的研究与制备, 有可能为鱼糜制品的生产开拓出一个新的消费领域^[4]。因此, 提取泥鳅肌原纤维蛋白质进行研究开发很有价值。

为了提高泥鳅鱼糜制品的凝胶特性, 可以采用在肌原纤维蛋白中添加淀粉的方法, 目前在泥鳅肌原纤

收稿日期: 2019-10-19; 修回日期: 2020-02-16

基金项目: 天津市企业科技特派员项目(18JCTPJC56700); 天津市一二三产业融合发展科技示范工程项目(17ZXYENC00140)

作者简介: 胡爱军(1968—), 男, 安徽铜陵人, 教授, hajpapers@163.com

维蛋白中添加淀粉的研究较少. 本研究采用的是木薯淀粉. 木薯淀粉是一种大分子多糖, 具有多种功能特性, 可作为鱼糜制品中传统使用的增稠剂、持水剂与黏合剂, 能使鱼糜制品保持良好的凝胶特性, 在生产过程中可起到至关重要的作用. 本实验以制备泥鳅肌原纤维蛋白凝胶为基础, 探究添加木薯淀粉对凝胶的硬度、弹性、白度、保水性、微观结构的影响, 为泥鳅鱼糜制品的生产与开发提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 原料、试剂与仪器

实验原料为市购两年生雌性黄板鳅, 选取个体大小相似、身型均匀完好的泥鳅(体长约为 20 cm, 质量约为 60 g); 木薯淀粉, 安琪酵母股份有限公司.

磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、氯化钠、氯化镁、乙二胺四乙酸二钠、牛血清蛋白、考马斯亮蓝、戊二醛、乙醇, 国产分析纯.

JYL-C012 型粉碎机, 九阳股份有限公司; Sorvall ST 16 型离心机, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; HH-4J 型水浴锅, 金坛市白塔新宝仪器厂; Alpha-1502 型紫外分光光度计, 深圳市鼎鑫宜实验设备有限公司; TA.XT plus 型质构仪, 英国 SMS 公司; YG268 型白度仪, 美国 3NH 公司; LGJ-10 型真空冷冻干燥机, 北京松源华兴科技发展有限公司; SU1510 型扫描电镜, 德国卡尔蔡司公司.

1.2 实验方法

1.2.1 肌原纤维蛋白的提取

以泥鳅为原料提取肌原纤维蛋白, 参考 Xiong 等^[5]的方法并加以改进, 用灭菌后的剪刀切掉泥鳅尾部 3~4 cm 于冰水中放血, 然后去头、去内脏, 洗净后用灭菌后的小刀取肉; 水洗 3 次后加入 4℃ 的 50 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液(含 0.1 mol/L NaCl、1 mmol/L EDTA、2 mmol/L MgCl₂, pH 7.0), 加入量(mL)为泥鳅肉样质量(g)的 4 倍, 在粉碎机中高速匀浆 3 min(工作 30 s, 停止 30 s), 8 500 r/min、4℃ 离心 15 min 后取沉淀, 重复上述步骤共提取 3 次. 向取得的沉淀中加入 4℃ 的 50 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液(含 0.6 mol/L NaCl、pH 7.0), 加入量(mL)为沉淀质量(g)的 3 倍, 在粉碎机中高速匀浆 30 s, 放入 4℃ 冰箱中浸提 20 h, 4℃、8 500 r/min 离心 15 min, 上清液即为肌原纤维蛋白质溶液, 于 4℃ 冰箱中保存, 并在 2 d 内使用.

1.2.2 泥鳅肌原纤维蛋白-淀粉复合凝胶的制备

参考 Bradford^[6]的方法并加以改进. 用考马斯亮蓝法测定蛋白质量浓度, 并调整肌原纤维蛋白液的质量浓度为 40 mg/mL. 木薯淀粉的添加量为肌原纤维蛋白溶液中蛋白质质量的 0%、2%、4%、6%、8% 和 10%, 混合均匀后置于水浴锅中加热, 90℃ 水浴 20 min; 取出冷却至室温, 从而得到泥鳅肌原纤维蛋白-淀粉复合凝胶, 于 4℃ 冰箱中保存过夜.

1.2.3 凝胶质构的测定

取平衡后的泥鳅肌原纤维蛋白-淀粉复合凝胶, 切成直径 12 mm、高度 10 mm 的小段, 用质构分析仪测定凝胶质构, 每个样品进行 3 次平行实验. 质构仪测定参数: 探头类型 P/0.5, 触发力 10.0 g, 测定前速度 2.00 mm/s, 测定速度 1.00 mm/s, 测定后速度 1.00 mm/s, 压缩百分比 40%, 环境温度为室温.

硬度: 凝胶受外力挤压发生变形时的最大压力值, 即对凝胶实施两次下压时第一个峰的峰值, 单位为 g.

弹性: 对凝胶实施两次挤压时, 第一次挤压变形后的回弹程度, 即第二次与第一次挤压所检测出的高度的比值.

1.2.4 凝胶保水性测定

参照 Foegeding^[7]的方法, 取 2 g 复合凝胶放入 10 mL 离心管中称质量, 4℃、4 000 r/min 离心 10 min, 离心后倒置离心管, 用滤纸吸走多余的水分, 静置 30 min 后再次称质量. 每个样品进行 3 次平行实验. 凝胶保水性按照式(1)计算.

$$\text{凝胶保水性} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为离心管质量, g; m_1 为离心前离心管和凝胶的质量, g; m_2 为离心后离心管和凝胶的质量, g.

1.2.5 凝胶白度的测定

泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的白度利用色差计测定 L^* 、 a^* 、 b^* 的值并按照式(2)^[8]计算. L^* 值表示亮度, 量程为 0(黑色)至 100(白色); a^* 值表示红度(a^* 值为正值表示样品为红色, a^* 值为负值表示样品为绿色); b^* 值可体现出被测物体的黄度(b^* 值为正值表示黄色, b^* 值为负值表示蓝色). 每个样品进行 3 次平行实验.

$$\text{凝胶白度} = 100 - \left[(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2} \right]^{0.5} \quad (2)$$

1.2.6 凝胶微观结构的观察

将肌原纤维蛋白-淀粉复合凝胶样品切割成厚 2 mm 的小条, 并将切好的小条放在戊二醛(4%)溶液

中 24 h 浸泡固定;然后用 0.1 mol/L pH 7.0 磷酸缓冲液反复冲洗样品 3 次;冲洗后使用不同体积分数的乙醇(50%、60%、70%、80%、90%、100%)进行脱水处理,每次脱水时间为 5 min. 随后将脱水后的凝胶放入真空冷冻干燥机中进行干燥处理,喷金后使用扫描电镜观察微观结构.

1.3 数据分析

每个实验至少重复 3 次,使用 Excel 软件进行实验数据平均值和式(1)、式(2)的计算,使用 SPSS Statistics 21 软件进行实验数据的显著性检验,不同字母表示组间差异显著. 使用 Origin 2018 软件作图.

2 结果与分析

2.1 木薯淀粉添加量对凝胶硬度的影响

不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶硬度的影响如图 1 所示. 从图 1 可以看出:泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的硬度随木薯淀粉添加量的增加整体呈增加趋势. 当木薯淀粉的添加量为 2%~6%时,凝胶硬度之间差异不显著,但与不添加木薯淀粉相比有显著提升;当添加 8%和 10%的木薯淀粉时,凝胶硬度相较于其他组获得了明显的增长,显著高于其他组.

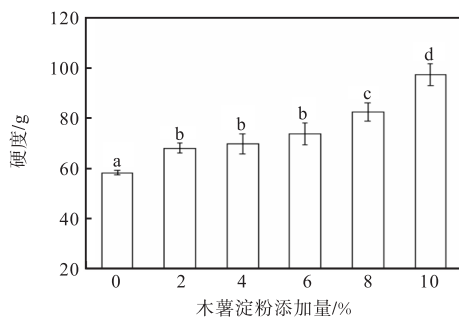


图 1 不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶硬度的影响

Fig. 1 Effect of different dosage of cassava starch on the hardness of myofibrillar protein gel

这可能的原因是在加热过程中,不仅蛋白质之间会发生相互作用,淀粉也会发生吸水溶胀并形成淀粉凝胶体系,使得鱼糜加热过程中出现盐溶性蛋白-淀粉分子-水的混合凝胶体系,蛋白质之间、多糖之间、蛋白质与多糖之间也可以发生相互作用,使得泥鳅肌肉蛋白的强度和韧性得到了提高,从而使得凝胶的硬度得到加强^[9]. 随着淀粉添加量的增加,复合凝胶的硬度主要受淀粉糊化的影响,经加热(90℃)提高了淀粉的糊化程度并增强了吸水膨胀作用,淀粉分子间

的随机结合程度也随之增加,这就加强了分子间以及分子内部的联系,有利于淀粉充分地填充在蛋白质的网络结构中,从而使得凝胶的结构更紧密,凝胶硬度达到最大. 有研究^[10]认为淀粉颗粒受热膨胀嵌入到凝胶网络结构中,挤压蛋白网络结构从而使硬度增加. 也有研究^[11]表明糊化后的淀粉可以增强鱼糜制品的凝胶硬度.

2.2 木薯淀粉添加量对凝胶弹性的影响

不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶弹性的影响如图 2 所示. 从图 2 可以看出:泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的弹性随着木薯淀粉添加量的增加而先上升后略有下降,整体上处理组大于对照组,且在添加量为 8%时弹性达到最大.

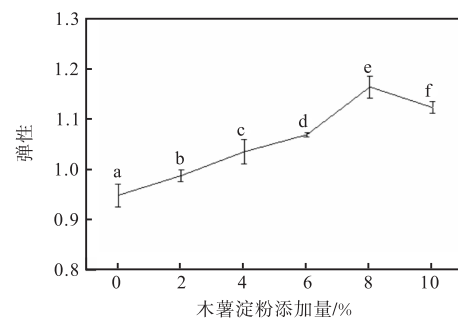


图 2 不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶弹性的影响

Fig. 2 Effect of different dosage of cassava starch on the elasticity of myofibrillar protein gel

这可能是由于淀粉糊化而形成富有弹性的胶体,在一定程度上可以增加凝胶的弹性;同时蛋白质受热变性形成三维网络结构,淀粉在糊化作用下吸水膨胀并填充于蛋白凝胶网络结构中,促进共价交联作用,使得弹性提高. 变性蛋白质分子间的动态平衡状态通过静电斥力和静电引力的相互作用来维持^[12]. 当木薯淀粉添加量为 8%时,泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的弹性达到最佳,可能是因为肌动蛋白和肌球蛋白等内部各亚基和淀粉分子疏水基团的充分暴露,各亚基之间重新相互作用,使得蛋白凝胶三维网络结构弹性较好. 而随着淀粉添加量增加到 10%时,体系内游离水减少,凝胶会出现过硬过韧的现象,而导致弹性略有下降^[13]. 实验表明:适量淀粉的添加可对复合凝胶弹性的提升起到正面作用;而当淀粉添加过量时,过多的淀粉可能会对蛋白凝胶的形成起阻碍作用,降低凝胶弹性.

2.3 木薯淀粉添加量对凝胶保水性的影响

不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝

胶保水性的影响如图 3 所示. 从图 3 中可以得知: 泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的保水性随着木薯淀粉添加量的增加而呈不断上升趋势, 处理组的保水性均大于对照组. 当木薯淀粉添加量为 2% 时, 与对照组相比保水性增加的不显著; 在添加量为 4% 时, 保水性较之前显著增加; 当添加量在 4% 以上时, 保水性逐渐增加, 但增加不显著.

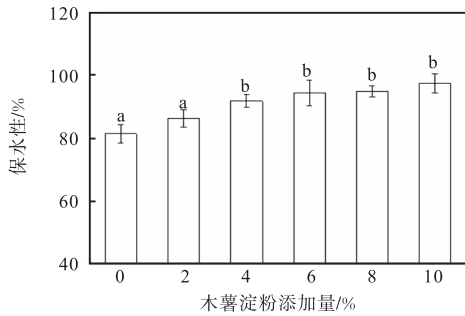


图 3 不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶保水性的影响

Fig. 3 Effect of different dosage of cassava starch on water retention of myofibrillar protein gel

这可能是由于淀粉经过加热发生糊化, 吸水溶胀, 将自由水转化为结合水, 将其填充在蛋白质的三维网络结构中, 可以有效减少水分损失; 加热使得淀粉颗粒晶体结构发生改变, 支链淀粉解开, 氢氧根暴露出来, 从而加强了淀粉与水之间的结合^[14]. 因此随淀粉添加量的增大, 更多的水分被锁住, 复合凝胶体系的保水性增强. 同时淀粉的糊化会在一定程度上改变蛋白质-淀粉的网状结构, 使得结构越来越紧密, 同时增强了与水结合的能力, 能够更好地锁住水分, 从而增大保水性. 有研究表明, 肌球蛋白的变性作用或者高度水合蛋白减缓了聚集速度, 所以会造成保水能力增加. 在蛋白质发生有序聚集之前, 升温以及淀粉的加入会促进肌球蛋白和肌动蛋白链的展开, 从而进一步提高凝胶的保水能力以及促进优良凝胶结构的形成^[15].

2.4 木薯淀粉添加量对凝胶白度的影响

不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶白度的影响如图 4 所示. 由图 4 可知: 泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的白度随着木薯淀粉添加量的上升而呈下降的趋势.

淀粉经加热发生糊化, 淀粉颗粒吸水溶胀会持有更多的水分, 使得光反射改变; 同时由于淀粉糊化后淀粉糊具有良好的透明度, 所以随淀粉添加量的增加, 淀粉糊化程度增加, 透明度升高, 透过的光多了,

反射的光少了, 导致白度降低. 本研究表明, 木薯淀粉的添加对凝胶白度影响较大.

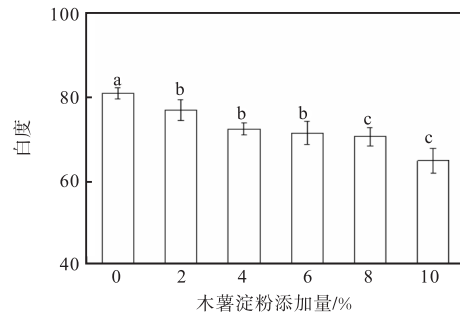


图 4 不同添加量的木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶白度的影响

Fig. 4 Effect of different dosage of cassava starch on the whiteness of myofibrillar protein gel

2.5 木薯淀粉添加量对凝胶微观结构的影响

不同木薯淀粉添加量下泥鳅肌原纤维蛋白凝胶电镜图如图 5 所示.

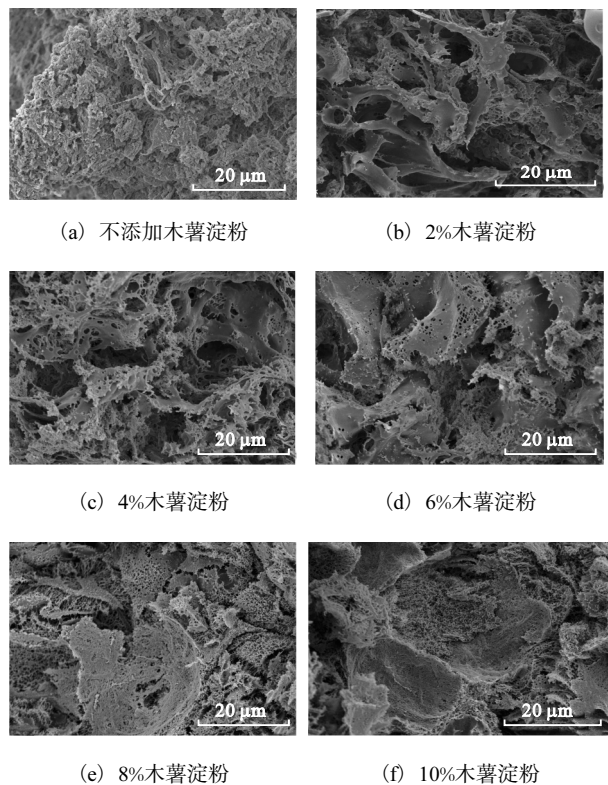


图 5 不同木薯淀粉添加量下泥鳅肌原纤维蛋白凝胶电镜图

Fig. 5 Gel electrophoresis of loach myofibrillar protein with different cassava starch dosage

由图 5(a)可知: 当不添加木薯淀粉时, 形成的凝胶呈条状、不均匀、疏松的三维立体网络结构. 由于其化学成分主要为肌原纤维蛋白质, 随着温度升高, 会发生蛋白质的伸展, 聚集直至形成凝胶网络结

构.对比图 5(a)和图 5(b)~(f)可知,由肌原纤维蛋白质构成的凝胶所形成的网络结构明显不同于该蛋白质与淀粉共同形成的凝胶结构.图 5(b)~(f)表明:淀粉的添加量会影响凝胶结构的形成,淀粉含量较低时,形成的复合凝胶结构出现了较多孔洞,凝胶的网络结构也松散无序;随着淀粉含量的增加,凝胶的交联程度增加,凝胶更趋于致密均匀,表面略有孔洞,截面平整.

这可能的原因是蛋白质具有比较完整的三维网络结构,更多的淀粉经高温糊化后与蛋白质通过分子间作用力相结合,吸水溶胀填充到蛋白质网络结构的孔洞中,将更多的游离水束缚进凝胶结构^[16],使孔洞的大小和数量减少,形成较致密的网络结构.淀粉本身也会由于热的作用形成网络结构.随着淀粉添加量的增加,通过毛细管作用被束缚或聚集在凝胶网络内的水分子越多^[17-18],凝胶结构越致密均匀;同时单位体积内淀粉分子增多,分子密度变大,孔隙度降低,因此网络结构越来越致密.Sun 等^[19]发现木薯淀粉能有效提高草鱼肌原纤维蛋白-淀粉复合凝胶的结构性能,且蛋白网络的聚集性随淀粉添加量的增大而提高.另有研究^[20]表明,肌原纤维蛋白凝胶微观结构和它的保水性具有一定的关系,若凝胶网络均匀致密,则说明凝胶保水性高;若凝胶网络结构松散粗糙,则表明保水性低.本实验表明凝胶微观结构的结果与保水性的结果一致.

3 结 语

泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的硬度、保水性、致密程度均与木薯淀粉的添加量存在正相关性.随着木薯淀粉质量分数的增大,凝胶的硬度和保水性增加,白度下降;弹性先增大后减小,适量的木薯淀粉对凝胶的弹性有一定的增强效应,若淀粉过量,则会造成体系内游离水减少,复合凝胶出现过硬过韧的现象,导致弹性略有下降;凝胶的微观结构越加致密,且截面趋于平整.本实验结果对泥鳅相关制品的开发具有一定的参考价值 and 实际意义,为鱼糜类、肉丸类产品的生产提供了技术支持.

参考文献:

- [1] 张宏伟. 泥鳅多糖的分离、纯化及其抗氧化活性的研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [2] 刘娜. 鸡腿肉中肌原纤维蛋白的性质研究[D]. 天津:天津商业大学,2012.
- [3] 刘锐,陈洁. 我国水产品加工业发展现状及潜力分析[J]. 农业展望,2010,6(4):33-35.
- [4] 杨速攀,彭增起. 肌原纤维蛋白凝胶研究进展[J]. 河北农业大学学报,2003,26(S1):160-166.
- [5] Xiong Y L, Brekke C J. Gelation properties of chicken myofibrils treated with calcium and magnesium chlorides[J]. Journal of Muscle Foods, 1991, 2(1):21-36.
- [6] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2):248-254.
- [7] Foegeding E A. Functional properties of turkey salt-soluble proteins[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(6):1495-1499.
- [8] Megumi M, Hung P V, Maeda T, et al. Recent advances in application of modified starches for breadmaking[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(11):591-599.
- [9] 李丹辰,陈丽娇,梁鹏,等. 木薯淀粉与木薯变性淀粉鱼糜加工性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(8):60-64.
- [10] 邓思杨,杨明,潘男,等. 淀粉与转谷氨酰胺酶复配引起肌肉蛋白功能特性的变化[J]. 食品科学, 2018, 39(12):133-139.
- [11] Kim J M, Lee C M. Effect of starch of textural properties of surimi gel[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(3):722-725.
- [12] Wu M C, Lanier T C, Hamann D D. Thermal transitions of admixed starch/fish protein systems during heating[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(1):20-25.
- [13] 翟小波,李洪军,贺稚非. 薯类淀粉对兔肉肉糜流变性质和凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(12):49-56.
- [14] Tananuwong K, Reid D S. DSC and NMR relaxation studies of starch-water interactions during gelatinization[J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 58(3):345-358.
- [15] Westphalen A D, Briggs J L, Lonergan S M. Influence of pH on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat induced gelation[J]. Meat Science, 2005, 70(2):293-299.
- [16] 夏秀芳,王博,伊东,等. 转谷氨酰胺酶和淀粉复配对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6):51-56.
- [17] Das S K, Prabhakaran P, Tanwar V K, et al. Effect of

3 结 论

(1) 蒸汽爆破处理小麦秸秆可以有效去除半纤维素。小麦秸秆原料中半纤维素质量分数为 23.5%，在压力 1.8 MPa、保压时间 6 min 的条件下对半纤维素的脱除效果较好，半纤维素脱除 88.2%；此条件下对纤维素的保留效果也较好，纤维素回收率为 80.5%。

(2) 蒸汽爆破处理对小麦秸秆纤维结构有显著的影响，可以使其相对结晶度增加；同时，经过蒸汽爆破处理物料的最大分解速率温度也会升高。

(3) 通过对物料的 SEM 分析可知，蒸汽爆破处理后物料细胞壁被破坏，纤维束结构变得松弛，表面积增大，纤维表面形态发生了明显变化。

参考文献:

- [1] Hammett A L, Youngs R L, Sun X, et al. Non-wood fiber as an alternative to wood fiber in Chinas pulp and paper industry[J]. *Holzforschung*, 2001, 55(2): 219–224.
- [2] 李蕊, 杨桂花, 吕高金, 等. 玉米秸秆半纤维素的逐级分离及其结构表征[J]. *中国造纸学报*, 2017, 32(3): 1–6.
- [3] 肖琳. 秸秆预处理工艺与水解糖发酵生产乙醇适配性探索[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [4] 希默尔. 生物质抗降解屏障[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [5] 赵军英. 植物生物质多孔介质特性与抗降解屏障的破解[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [6] 张中山, 杨桂花, 李蕊, 等. 蒸汽爆破预处理对杨木化学组分溶出效率的影响[J]. *中华纸业*, 2016, 37(20): 82–85.
- [7] 王风芹, 尹双耀, 谢慧, 等. 前处理对玉米秸秆蒸汽爆破效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 273–280.
- [8] 曾靖山, 胡健, 郑焱嵩, 等. 蔗渣蒸汽爆破法制浆蒸汽爆破因子的研究[J]. *中国造纸*, 2004, 23(11): 23–24.
- [9] Peng F, Bian J, Ren J L, et al. Fractionation and characterization of alkali-extracted hemicelluloses from peashrub[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 39: 20–30.
- [10] 任天宝, 徐桂转, 马孝琴, 等. 蒸汽爆破对玉米秸秆理化特性的影响[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(2): 227–234.
- [11] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [12] 李心收. 能源草的蒸汽爆破法预处理研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [13] 杨淑蕙. 植物纤维化学[M]. 3版. 北京: 中国轻工业出版社, 2001.
- [14] 潘诚, 刘忠, 惠岚峰. 蒸汽爆破-乙醇蒸煮两步预处理对麦秆结构的影响[J]. *林产化学与工业*, 2016, 36(6): 76–80.
- [15] Bu L, Tang Y, Gao Y, et al. Comparative characterization of milled wood lignin from furfural residues and corn-cob[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 175: 176–184.
- [16] Sun R, Tomkinson J, Sun X, et al. Fractional isolation and physico-chemical characterization of alkali-soluble lignins from fast-growing poplar wood[J]. *Polymer*, 2000, 41(23): 8409–8417.
- [17] 陈德坤, 陈嘉川, 杨桂花, 等. 氧气-离子液体预处理对麦草酶解效率的影响[J]. *中国造纸*, 2016, 35(6): 33–37.
- [18] 付顺鑫. 麦秸蒸汽爆破改性处理与制板工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.

责任编辑: 周建军

(上接第 25 页)

some plant starches and carrageenan as fat substitutes in chicken patties[J]. *Journal of Animal Science*, 2015, 93(7): 3704–3712.

- [18] Fan M, Hu T, Zhao S, et al. Gel characteristics and microstructure of fish myofibrillar protein/cassava starch composites[J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 221–230.
- [19] Sun F, Huang Q, Xiong S, et al. Effects and mechanism

of modified starches on the gel properties of myofibrillar protein from grass carp[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 64: 17–24.

- [20] Barbut S, Foegeding E A. Ca²⁺-induced gelation of pre-heated whey protein isolate[J]. *Journal of Food Science*, 1993, 58(4): 867–871.

责任编辑: 郎婧