

不同糊化度马铃薯淀粉的黏度及凝胶特性分析

徐芬¹, 刘伟¹, 刘倩楠¹, 周童童¹, 刘鑫硕¹, 胡宏海¹, 张泓^{1,2}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

(2. 合肥中农科泓智营养健康有限公司, 中国农业科学院合肥食品营养与健康创新研究院, 安徽合肥 238000)

摘要: 为探究不同糊化度马铃薯淀粉黏度及其凝胶特性的差异, 本研究将马铃薯淀粉乳(料液比 1:9)分别置于 59 ℃和 60 ℃条件下加热 1、3、6、9、12、15、18 min, 制备出糊化度为 38.70%~91.13%的马铃薯淀粉样品。测定了不同糊化度马铃薯淀粉的黏度, 微观结构, 凝胶强度及弹力, 并分析了马铃薯淀粉理化特性与其糊化度的相关性。结果表明, 随水热处理温度升高和时间延长, 马铃薯淀粉颗粒逐渐破裂, 椭圆形特征形貌逐渐消失。马铃薯淀粉黏度, 凝胶强度及弹力与其糊化度有显著的线性相关性 ($p<0.01$)。随糊化度的增大, 预糊化马铃薯淀粉黏度由 0.17 mJ 增加至 3.40 mJ。未经二次加热的不同糊化度马铃薯淀粉凝胶强度和弹力随初始糊化度的增大而显著增大, 但经二次加热完全糊化的马铃薯淀粉凝胶的强度和弹力随初始糊化度的增大而显著降低。不同程度的预糊化处理显著改变了马铃薯淀粉的黏度及凝胶特性。

关键词: 马铃薯淀粉; 糊化度; 黏度; 微观结构; 凝胶强度

文章编号: 1673-9078(2020)05-42-50

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.5.007

Viscosity and Gelling Properties of Potato Starch with Different Degrees of Gelatinization

XU Fen¹, LIU Wei¹, LIU Qian-nan¹, ZHOU Tong-tong¹, LIU Xin-shuo¹, HU Hong-hai¹, ZHANG Hong^{1,2}

(1. Institute of Food Science and Technology CAAS/Comprehensive Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China) (2. Hefei CAAS NutriDoer Co. Ltd., Academy of Food Nutrition and Health Innovation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hefei 238000, China)

Abstract: In this study, potato starch dispersions (material-liquid ratio 1:9) were heated at 59 ℃ and 60 ℃ for 1, 3, 6, 9, 12, 15 and 18 min, respectively, to yield starch samples with different degrees of starch gelatinization (DSG) (38.70% to 91.13%), to explore the differences in viscosity and gelation properties of these potato starch samples. The viscosity, microstructure, gel strength, and elasticity of potato starch with different DSGs were determined, and the correlation between the physicochemical properties and DSG was also analyzed. Results showed that with the increase of hydrothermal treatment temperature and time, potato starch granules were gradually ruptured, and the characteristic shape of starch granules gradually disappeared. There was a significant ($p<0.01$) linear correlation between potato starch viscosity, gel strength and elasticity and its DSG. The viscosity of pregelatinized potato starch increased from 0.17 mJ to 3.40 mJ with the increase of DSG. With the increase of initial DSG, the gel strength and elasticity of potato starch samples with different DSGs increased in the absence of re-heating but decreased after reheated. Different degrees of pre-gelatinization significantly changed the viscosity and gel characteristics of potato starch.

Key words: potato starch; degree of gelatinization; viscosity; microstructure; gel strength

引文格式:

徐芬, 刘伟, 刘倩楠, 等. 不同糊化度马铃薯淀粉的黏度及凝胶特性分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 42-50

XU Fen, LIU Wei, LIU Qian-nan, et al. Viscosity and gelling properties of potato starch with different degrees of gelatinization [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 42-50

收稿日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31601507); 国家马铃薯产业技术体系 (CARS-09)

作者简介: 徐芬 (1991-), 女, 博士研究生, 研究方向: 谷物科学与技术

通讯作者: 胡宏海 (1975-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工理论与技术; 共同通讯作者: 张泓 (1958-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工理论与技术

马铃薯是种植范围广泛的块茎类经济作物,在气候条件恶劣、水资源缺乏、土地贫瘠的环境中仍可保持较高产量。马铃薯鲜薯中淀粉含量一般为9%~25%,是提取淀粉的主要原料之一。相较于其他种类的淀粉,马铃薯淀粉颗粒大(25~100 μm),且含有天然磷酸基团,这些磷酸基带有负电荷,其在水溶液中的排斥作用可使马铃薯淀粉快速水合,加上其内部结晶结构比较致密,使其具有较高的持水性和膨胀度;马铃薯淀粉支链淀粉含量较高,分子量大,因此其初始糊化温度较低(56~66 $^{\circ}\text{C}$),易于糊化,且马铃薯淀粉中直链淀粉的聚合度很高,所以马铃薯淀粉糊黏度较高;此外,马铃薯淀粉分子结构中结合的磷酸基及其不含有脂肪酸可使其形成高透明度的淀粉糊^[1,2]。这些特性有利于食品品质保持和提升,因此马铃薯淀粉及其改性产品在面条类、焙烤类、灌装食品及各类酱、汤、小吃等食品加工领域得到广泛应用^[3]。

预糊化淀粉是物理改性淀粉的重要种类之一,也称 α -淀粉。预糊化淀粉是原淀粉在适量的水或亲水溶剂存在条件下加热,利用水或亲水溶剂使分子间氢键断裂、破坏排列规律的胶束结构,完全糊化后,迅速干燥得到的多孔状、氢键断开、无双折射现象、无明显结晶的淀粉颗粒。与原淀粉相比,它具有特殊的凝胶特性及质构特性,较好的冷水速溶性、高黏度、高分散性和高膨胀性等特点^[4-6]。目前,预糊化淀粉已广泛应用于食品加工中^[7-9]。糊化度是预糊化淀粉的一个重要质量指标,糊化度直接影响产品质量^[10]。Fu等探究了不同糊化度的玉米淀粉的结构和热力学特性,结果表明部分糊化的玉米淀粉颗粒的表面形貌发生皱缩,出现多重褶皱。随糊化度的增大玉米淀粉结晶度降低,糊化温度升高,糊化焓降低^[11]。石磊探究了不同糊化度的玉米面团质构特性的变化,结果表明,随糊化度的上升,面团硬度上升、黏着性下降,并通过与小麦面团进行对比,筛选出糊化度为70%的玉米面团其加工品质最优^[12]。但是目前国内外学者对不同糊化度淀粉特性的探究仍然较少,尤其是不同糊化度马铃薯淀粉理化特性的差异及其在面制品中的应用未见报道。本研究探究了马铃薯淀粉黏度、凝胶强度、微观形貌随糊化度的变化情况,建立了马铃薯淀粉理化指标与其糊化度的相关性,为预糊化马铃薯淀粉的加工和应用提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

马铃薯淀粉购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,

淀粉含量为89%,蛋白0.27%,灰分0.42%。淀粉、蛋白和灰分均为干基含量。原料粉中水分、粗蛋白及灰分含量根据AOAC标准方法测定,总淀粉含量采用总淀粉测试试剂盒(美国Sigma-Aldrich公司)测定。

1.2 仪器与设备

HH-4A 数显恒温磁力搅拌水浴锅,常州荣华仪器制造有限公司;GenesisTM SQ 中试型冷冻干燥机,美国 Virtis 公司;Q200 差示量热扫描仪,美国 TA 公司;Super 4 快速黏度测定仪,瑞典波通公司;CT3 质构仪,美国 Brookfield 公司;BK5000 双目生物显微镜,重庆奥特光学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

为制备糊化度显著不同的马铃薯淀粉样品,本研究选用59 $^{\circ}\text{C}$ 和60 $^{\circ}\text{C}$ 两个温度点对马铃薯淀粉样品进行不同时间(1、3、6、9、12、15、18 min)的水热处理。选择这两个温度点主要是基于样品初始糊化温度和预实验的结果,过低的温度处理比较难在较短的时间内得到糊化度较大的样品,过高的温度处理,则在加热很短的时间内,淀粉就已经糊化程度很高。为了在易于控制的加热时间内,得到糊化度显著不同的马铃薯淀粉样品,我们采用了59 $^{\circ}\text{C}$ 和60 $^{\circ}\text{C}$ 分别对样品进行预水热处理,并对水热处理后的样品进行糊化度的测定,以确保得到的样品其糊化度显著不同。马铃薯淀粉的糊化特性受海拔高度大气压影响,特此给出实验室海拔高度:51 m 的平原地区。不同糊化度马铃薯淀粉样品的制备实验重复三次并进行糊化度的测定。具体样品制备方法如下:

不同糊化度马铃薯淀粉糊制备:将6个盛有360 mL 蒸馏水的500 mL 烧杯放入磁力搅拌水浴锅中,设定反应温度,待温度稳定后(利用数显温度计精确测量烧杯中水温),向烧杯中分别加入40 g 马铃薯原淀粉(料液比1:9)。分别在59 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 和60 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 条件下水热处理1 min, 3 min, 6 min, 9 min, 12 min, 15 min 和18 min。水热处理结束后,从水浴锅中取出烧杯并迅速放入冰水中,将温度迅速降至25 $^{\circ}\text{C}$,制备不同糊化度马铃薯淀粉糊(以下简称:淀粉糊样品)。

不同糊化度马铃薯淀粉冻干粉制备:冷却至25 $^{\circ}\text{C}$ 的马铃薯淀粉糊放入冰箱中冷冻,预冻完成后,将样品进行真空冷冻干燥。冻干结束后的样品用研钵研磨成粉末,过70目筛,保证原料粉颗粒大小一致(以下简称:冻干粉样品)。

不同糊化度马铃薯淀粉凝胶制备:冷却至25 $^{\circ}\text{C}$ 的

马铃薯淀粉糊倒入直径为 40 mm, 深度 25 mm 的称量瓶中, 用保鲜膜封口, 以防止水分散失。将称量瓶置于 4 ℃ 冰箱中冷藏 24 h, 制备待测淀粉凝胶 (以下简称: 未二次加热淀粉凝胶)。

二次加热后马铃薯淀粉凝胶制备: 冷却至 25 ℃ 的马铃薯淀粉糊置于 95 ℃ 水中再次加热 20 min, 将样品完全糊化, 后将淀粉糊倒入直径为 40 mm, 深度 25 mm 的称量瓶中, 用保鲜膜封口。将称量瓶置于 4 ℃ 冰箱中冷藏 24 h, 制备待测淀粉凝胶 (以下简称: 二次加热后淀粉凝胶)。

1.3.2 热力学特性测定

利用差示量热扫描仪 (DSC) 测定不同水热处理后马铃薯淀粉的热力学特性。准确称取 3 mg 冻干粉样品于铝盒中, 每个样品加 10 μ L 水, 密封铝盒, 设置温度范围为 20~100 ℃, 升温速率为 5 ℃/min。以空铝盒作对照。对热力学曲线进行手动积分, 得到 T_0 : 初始糊化温度、 T_p : 峰值糊化温度、 T_c : 糊化结束温度、 ΔH : 热焓值 (相转变热)。导出原始数据组, 计算不同条件水热处理后马铃薯淀粉的糊化度并利用 excel 对数据进行整理做图, 所有样品测试 3 次平行取平均值。糊化度计算公式如下^[13,14]:

$$DSG(\%) = (1 - \Delta H_{\text{样品}} / \Delta H_{\text{原淀粉}}) \times 100\%$$

其中: DSG-糊化度; ΔH -热焓值

1.3.3 质构仪黏度测定

利用质构仪测定淀粉糊样品黏性。选择圆柱形探头 TA 4/1000, 设定压缩距离 10 mm, 测定速度与返回速度均为 1.0 mm/s, 触发力为 2 g。用质构仪自带软

件分析淀粉糊黏性。所有样品测试 3 次平行取平均值。

1.3.4 光学显微镜观察

将微量不同糊化度马铃薯淀粉冻干粉样品加水均匀混合配成稀淀粉乳, 滴一滴在载玻片上, 盖上盖玻片, 放到载物台上, 在显微镜下进行调节光圈和焦距, 调节进光强度, 拍照^[15,16]。观察放大 100 倍后淀粉的颗粒形态。

1.3.5 凝胶强度和弹力测定

利用质构仪测定未二次加热和经二次加热处理后的淀粉凝胶强度, 测定参数参考 Min Cui 等的方法^[17]。选择圆柱形探头 TA 5, 设定压缩比为样品高度的 50%, 测试速度: 设定下压速度为 1.5 mm/s, 接触后速度 1.0 mm/s, 提升速度 1.0 mm/s, 设定触发力为 2 g。压缩试样所需的峰值压力记为凝胶强度, 通过软件计算可恢复功和压缩功的比值记为凝胶弹力, 所有样品测试 6 次平行取平均值^[18-20]。

1.3.6 相关性分析

选取不同水热条件下制备的马铃薯淀粉糊化度的数据和其黏度, 凝胶强度, 弹力的数据, 利用 Excel 做散点图, 并分析黏性及凝胶强度随糊化度线性变化的回归方程及相关系数。利用 SPSS 做两组数据的双变量相关性检验, 得到显著性检验的结果 P 值, 判断两者线性相关的显著性水平。

2 结果与讨论

2.1 不同水热处理马铃薯淀粉的糊化度

表 1 不同温度、时间水热处理后的马铃薯淀粉热力学特性变化

Table 1 The thermal properties of potato starch samples after pre-heating treatment under different temperature and time

淀粉	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
原淀粉	58.88 $\pm$ 0.13 ^{CDc}	62.47 $\pm$ 0.17 ^{CF}	73.23 $\pm$ 0.37 ^{Aa}	15.14 $\pm$ 0.4 ^{Aa}
59 ℃-1 min	58.65 $\pm$ 0.06 ^D	62.89 $\pm$ 0.13 ^C	71.43 $\pm$ 0.22 ^{BC}	9.28 $\pm$ 1.29 ^B
59 ℃-3 min	59.26 $\pm$ 0.07 ^C	64.30 $\pm$ 0.25 ^B	73.01 $\pm$ 0.52 ^A	7.36 $\pm$ 0.01 ^C
59 ℃-6 min	60.03 $\pm$ 0.04 ^B	65.03 $\pm$ 0.07 ^A	72.22 $\pm$ 0.30 ^{AB}	5.92 $\pm$ 0.59 ^C
59 ℃-9 min	60.15 $\pm$ 0.03 ^{AB}	65.42 $\pm$ 0.08 ^A	73.06 $\pm$ 0.01 ^A	4.60 $\pm$ 0.48 ^C
59 ℃-12 min	59.34 $\pm$ 0.33 ^C	63.69 $\pm$ 0.66 ^B	72.06 $\pm$ 0.98 ^{AB}	5.87 $\pm$ 0.73 ^C
59 ℃-15 min	60.57 $\pm$ 0.44 ^A	65.68 $\pm$ 0.15 ^A	72.54 $\pm$ 0.90 ^{AB}	4.77 $\pm$ 0.01 ^C
59 ℃-18 min	59.33 $\pm$ 0.08 ^C	62.98 $\pm$ 0.10 ^C	70.42 $\pm$ 0.90 ^C	4.49 $\pm$ 0.02 ^C
60 ℃-1 min	58.95 $\pm$ 0.15 ^c	63.74 $\pm$ 0.01 ^e	71.27 $\pm$ 0.45 ^{cd}	6.71 $\pm$ 0.27 ^b
60 ℃-3 min	60.15 $\pm$ 0.92 ^b	65.37 $\pm$ 0.21 ^b	72.06 $\pm$ 0.68 ^{bc}	4.13 $\pm$ 0.59 ^c
60 ℃-6 min	60.70 $\pm$ 0.47 ^b	64.98 $\pm$ 0.08 ^{bc}	72.22 $\pm$ 0.30 ^{abc}	3.75 $\pm$ 0.66 ^c
60 ℃-9 min	60.18 $\pm$ 0.08 ^b	64.36 $\pm$ 0.08 ^d	72.12 $\pm$ 0.60 ^{bc}	2.21 $\pm$ 0.10 ^d
60 ℃-12 min	60.67 $\pm$ 0.05 ^b	64.66 $\pm$ 0.09 ^{cd}	71.38 $\pm$ 0.15 ^{cd}	2.26 $\pm$ 0.46 ^d
60 ℃-15 min	62.25 $\pm$ 0.24 ^a	66.54 $\pm$ 0.01 ^a	73.02 $\pm$ 0.37 ^{ab}	2.20 $\pm$ 0.21 ^d
60 ℃-18 min	61.87 $\pm$ 0.21 ^a	65.02 $\pm$ 0.35 ^{bc}	70.63 $\pm$ 0.30 ^d	1.34 $\pm$ 0.02 ^d

注: A, B, C, D 代表原淀粉及 59 °C 条件下分别水热处理 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18 min 后样品间的显著性差异 ($p < 0.05$); a, b, c, d 代表原淀粉及 60 °C 条件下分别水热处理 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18 min 后样品间的显著性差异 ($p < 0.05$)。

利用 DSC 记录糊化过程中马铃薯原淀粉及预糊化淀粉的热力学特性参数, 结果如表 1 所示。实验结果表明, 马铃薯原淀粉的初始糊化温度 (T_0)、峰值糊化温度 (T_p)、糊化结束温度 (T_c)、焓值 (ΔH) 分别为 58.88 °C、62.47 °C、73.23 °C 及 15.14 J/g。预糊化马铃薯淀粉的 T_0 值显著高于原淀粉, 且随预水热时间的延长, T_0 值显著增大。 T_p 和 T_c 值没有观察到显著的变化趋势。但是, 预糊化处理的淀粉 ΔH 值显著低于原淀粉, 且随预水热时间的延长和温度的增大, ΔH 值显著降低。59 °C 条件下水热处理 1~18 min 后, ΔH 值从 9.28 J/g 下降至 4.49 J/g, 60 °C 条件下水热处理 1~18 min 后, ΔH 值从 6.71 J/g 下降至 1.34 J/g, 即糊化程度越高的样品其 ΔH 越小。Fu 等的研究也表明, 经不同条件喷雾干燥处理后的玉米淀粉, 其 T_0 值随糊化程度的增大而增大, 但 ΔH 值随糊化程度的增大而显著降低, 与本研究马铃薯淀粉的变化趋势一致^[11]。

预水热处理后淀粉样品的糊化度可通过公式进行计算, 结果如图 1 所示。实验结果表明, 59 °C 和 60 °C 的温度条件分别水热处理 1~18 min 可得到糊化度显著不同的预糊化马铃薯淀粉样品。其中糊化度最小值为 59 °C 水热处理 1 min 的样品, 最大值为 60 °C 水热处理 18 min 的样品。59 °C 条件下分别水热处理 1~18 min 可得到糊化度为 38.70%~70.32% 的样品, 60 °C 水热处理 1~18 min 可得到糊化度为 55.64%~91.13% 的预糊化马铃薯淀粉样品。随着水热时间的延长, 马铃薯淀粉糊化度逐渐增大, 且在同一加热时间条件下, 60 °C 水热处理的马铃薯淀粉糊化度显著大于 59 °C 条件下处理。

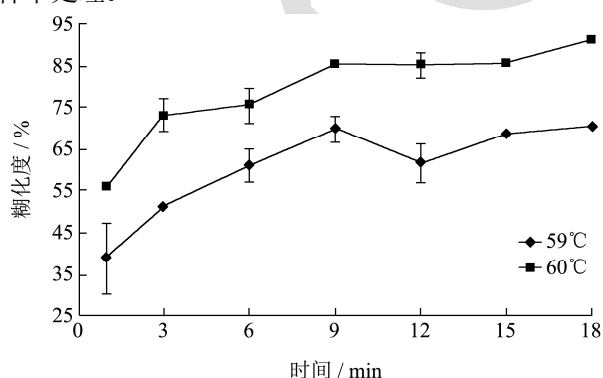


图 1 马铃薯淀粉糊化度随预水热处理时间的变化

Fig.1 Degree of potato starch gelatinization as a function of pre-hydrothermal treatment time

水热处理马铃薯淀粉过程中, 随温度的升高和时间的延长, 马铃薯淀粉吸水膨胀, 淀粉分子开始剧烈振动, 结晶结构间氢键被打破, 淀粉晶体熔融, 颗粒

溶胀, 当直链淀粉脱离淀粉颗粒时, 慢慢形成了淀粉糊, 且随温度的持续升高, 淀粉颗粒仍在继续吸水膨胀。当其体积膨胀到一定程度后, 颗粒便出现破裂现象, 颗粒内的淀粉分子向各方向伸展扩散, 溶出颗粒体外, 淀粉结晶区逐渐消失^[11,21]。在这个过程中, 伴随着能量的改变, 淀粉分子的状态发生了改变。不同的水热处理时间使马铃薯淀粉发生不同程度的糊化, 因此在利用 DSC 对不同预水热处理过的冻干粉进行测定过程中, 加热温度低, 加热时间短的样品, 淀粉分子间作用力较强, 其完全糊化所需能量较多, ΔH 值 (峰面积) 较大, 即计算出的糊化度相对较小。与之相反, 热处理温度高, 时间长的样品, 其 ΔH 值较小, 糊化度则相对较大。

2.2 不同糊化度马铃薯淀粉质构仪黏度特性

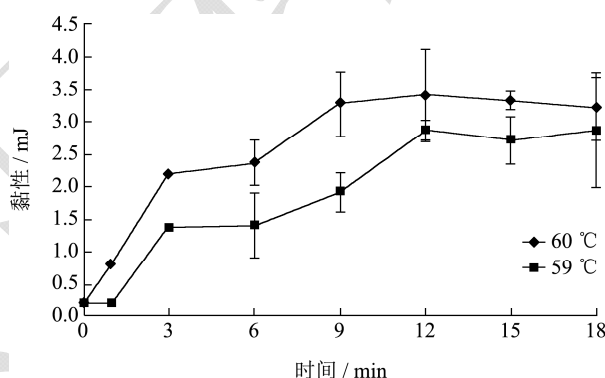


图 2 马铃薯淀粉糊黏性随预水热处理时间的变化

Fig.2 Viscosity of potato starch pastes as a function of pre-hydrothermal treatment time

利用质构仪测定了淀粉糊样品黏性。质构仪黏性感官定义为将样品从接触物表面拉开所做的功。其数学定义为压缩循环达到零负载处至测试结束处, 在横坐标负载和纵坐标距离测试曲线下的面积。不同条件水热处理马铃薯淀粉糊黏性随预加热时间的变化曲线如图 2 所示。随水热时间的延长, 马铃薯淀粉的黏性逐渐增加, 且 60 °C 水热处理的样品组黏性大于 59 °C 水热处理组。Gryszkin 等利用布兰德黏度计测定了经不同温度水热处理后的马铃薯淀粉糊, 结果表明与原淀粉相比, 预水热处理可将马铃薯淀粉黏度提高 50%^[22]。郭瑾利用流变仪测定了原淀粉和不完全糊化淀粉样品 (糊化度介于 7.8%~12.0% 之间) 的静态流变特性, 结果表明不完全糊化处理后, 各淀粉的稠度系数 K 均变大, 表明处理后淀粉糊的黏度增强^[23]。与本研究结果一致。

实验中发现, 当马铃薯淀粉溶液在 59 °C 加热 1

min 以上（即糊化度大于 38.70%）才能形成稳定均一的糊状溶液，而未加热的马铃薯原淀粉溶液和 59℃ 加热 1 min 的样品仍可观察到明显的淀粉沉淀。60℃ 条件下在本实验设定的所有加热时间条件下均可形成稳定的糊状溶液。由于未热处理的淀粉溶液和 59℃ 水热处理 1 min 的淀粉溶液发生明显分层现象，淀粉颗粒沉淀在烧杯底部，此时的溶液黏性测定目标主要是上层清液，黏性值小于 0.20 mJ。糊化度大于 38.7% 的样品组其黏性值大于 0.80 mJ，此时溶液呈均一糊状液，并随加热时间的延长，黏性值逐渐增大至 3.40 mJ。黏度增大的原因主要是原淀粉在水中加热，胶束结构逐渐崩溃，淀粉分子形成单分子，链状及分支状的淀粉分子互相联结、缠绕，形成具有黏性的糊状溶液^[5,22]。

2.3 不同糊化度马铃薯淀粉颗粒微观结构观察

利用光学显微镜观察不同糊化度马铃薯淀粉颗粒微观形貌，结果如图 3 所示。由图中可以观察到，马铃薯原淀粉颗粒（图 3a）完整，整体呈现不规则椭圆形，表面较为光滑，与文献报道一致^[24]。经水热处理后的马铃薯淀粉颗粒与原淀粉有明显区别。可清晰的观察到水热处理后马铃薯淀粉颗粒边缘逐渐模糊破裂，原有的椭圆状形貌遭到破坏。且随加热时间的延长，可以观察到更多的形貌不完整的马铃薯淀粉颗粒。这主要是马铃薯淀粉颗粒在水热处理过程中发生了一定程度的糊化。糊化过程中，淀粉氢键断裂破坏，侧链打开，使颗粒结构吸水膨胀破裂。研究也表明，淀粉糊化过程是淀粉微晶束熔融过程，淀粉分子混乱度增加，颗粒不可逆吸水膨胀，当其体积膨胀到一定程度后，颗粒便出现破裂现象^[25]。

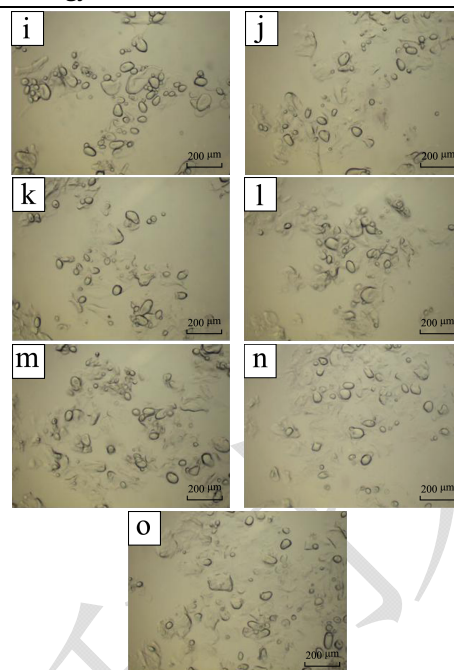
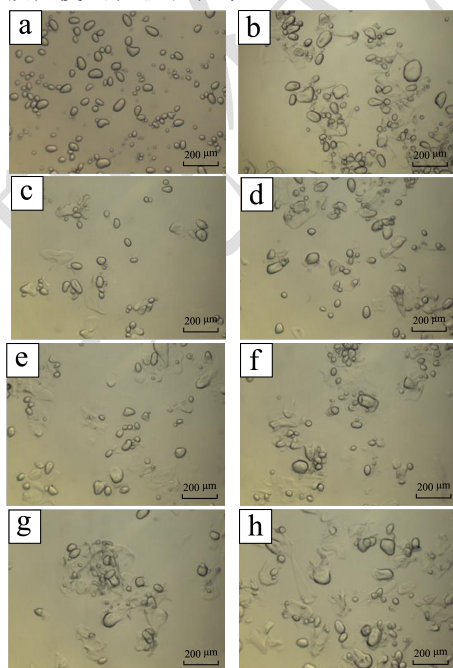


图 3 不同温度、时间水热处理后的马铃薯淀粉颗粒微观形貌

Fig.3 The microstructure of potato starch granules after pre-heating treatment under different temperature and time

注：a：马铃薯原淀粉；b~h：59℃ 条件下分别加热 1，3，6，9，12，15，18 min；i~o：60℃ 条件下分别加热 1，3，6，9，12，15，18 min。

2.4 不同糊化度马铃薯淀粉凝胶强度分析

测定了不同水热条件处理后马铃薯淀粉凝胶强度，包括未二次加热处理组和经二次加热处理组，结果如图 4 所示。结果表明，未二次加热的马铃薯淀粉凝胶（图 4a、b），其凝胶强度曲线图的峰值随预水热处理时间的延长而逐渐增大。且同一处理时间下，60℃ 淀粉凝胶强度高于 59℃ 处理组。即随着糊化度的增大，样品凝胶强度逐渐增大。未经二次沸水处理的马铃薯淀粉凝胶曲线图中未包含马铃薯原淀粉（未预加热处理）及 59℃ 加热 1 min 的样品，是因为在这两个条件下，淀粉糊未能形成稳定均一的糊状溶液，淀粉发生沉淀，经 4℃ 冰箱冷藏后，无法形成凝胶。观察经 95℃ 二次水浴的淀粉凝胶强度图（图 4c、d）可知，此时的凝胶强度峰值随预水热时间的延长而逐渐减小，与未经二次水浴处理的不同糊化度马铃薯淀粉凝胶强度的变化趋势相反。

为了更加直观的观察马铃薯淀粉凝胶强度的变化趋势，可通过软件分析图 4 的凝胶曲线图得到表征淀粉凝胶强度的峰值压力。峰值压力为曲线峰值硬度与横切面积的比值。凝胶峰值压力随淀粉溶液预加热时间的变化曲线图如图 5 所示。结果表明经二次加热的马铃薯淀粉凝胶强度值分布于 5000~20000 dyn/cm² 之

间,显著大于未二次加热组的凝胶强度值(1000~7000 dyn/cm²)。未二次加热的淀粉凝胶强度随着马铃薯淀粉预水热时间的延长而逐渐增大,且60℃加热的马铃薯淀粉凝胶强度大于59℃处理组。其中凝胶强度最小值为60℃预水热处理1 min的样品(832.43 dyn/cm²),最大值为60℃水热处理15 min的样品(6438.15 dyn/cm²)。但经过二次水浴加热后的样品组,其凝胶强度随预水热时间逐渐减小,与未经二次加热的样品呈现相反的变化趋势。其中凝胶强度最小值为未进行预糊化处理的原淀粉样品(7569.76 dyn/cm²),最大值为59℃水热处理3 min淀粉样品(18742.29 dyn/cm²),随后其凝胶强度值随预水热时间的延长显著降低,但经预水热处理的马铃薯淀粉凝胶强度值均大于原淀粉样品。有研究表明,预糊化马铃薯淀粉在完全糊化后其凝胶强度值显著大于原淀粉,与本研究结果一致^[22],但不同糊化度马铃薯淀粉在完全糊化后凝胶强度的变化尚未见报道。

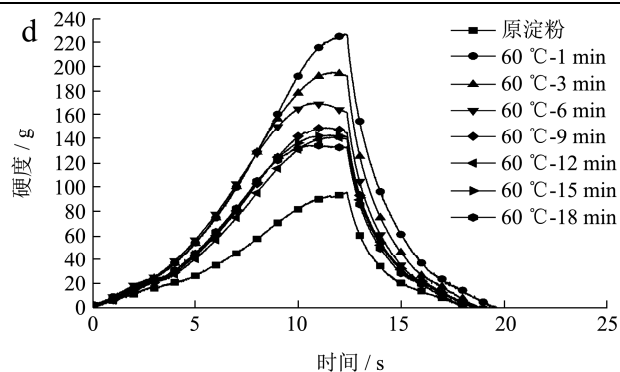
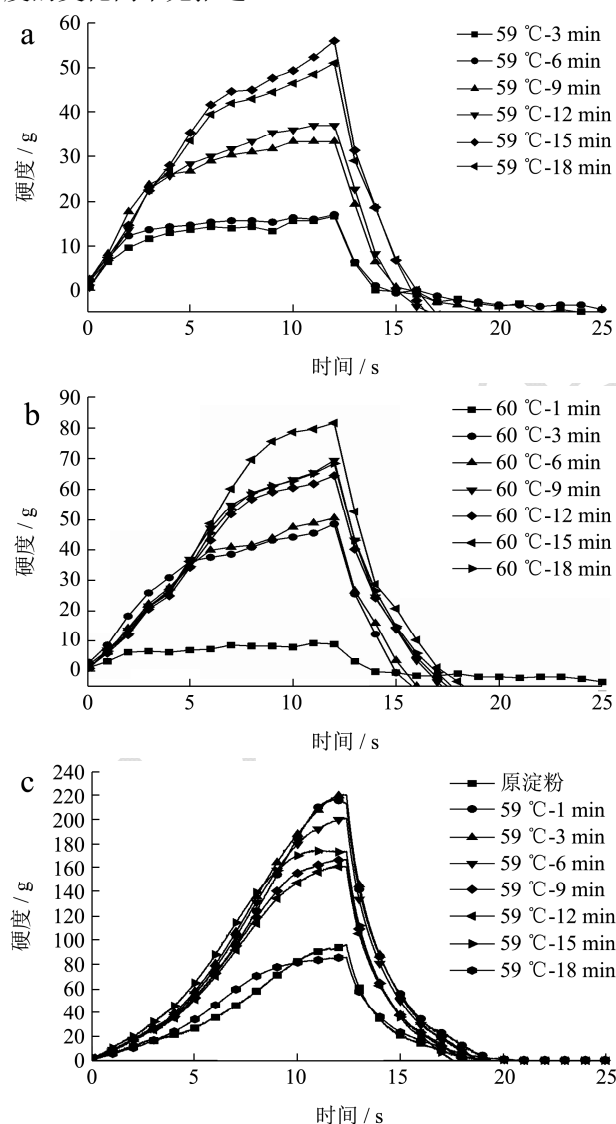


图4 未二次加热(a, b)和经二次加热(c, d)马铃薯淀粉凝胶强度曲线图

Fig.4 Gel strength curves of potato starch without (a, b) and with (c, d) re-heating

注: a、c: 59℃水热处理不同时间; b、d: 60℃水热处理不同时间。

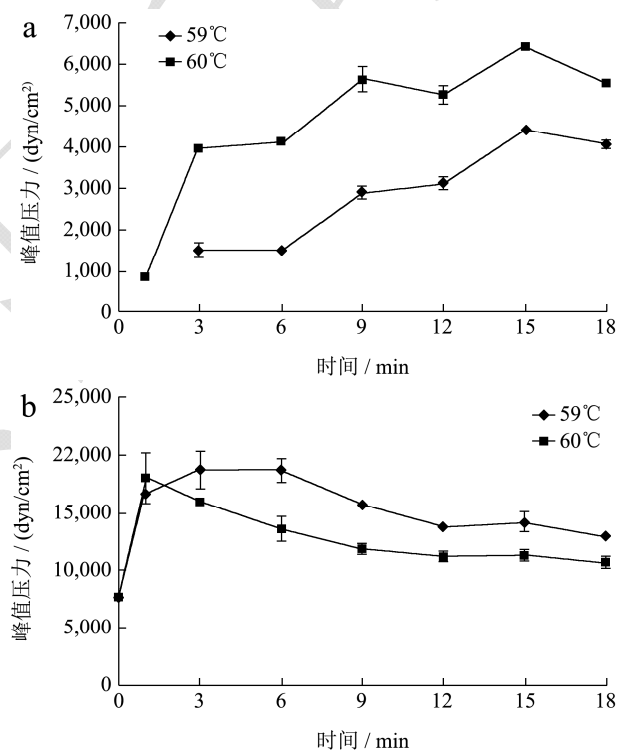


图5 未二次加热(a)和经二次加热(b)马铃薯淀粉凝胶强度(峰值压力)随预水热处理时间的变化

Fig.5 Gel strength of potato starch as a function of pre-hydrothermal treatment time without (a) and with (b) re-heating

2.5 不同糊化度马铃薯淀粉凝胶弹力分析

不同水热处理条件下,马铃薯淀粉凝胶弹力随预加热时间的变化曲线如图6所示。质构仪弹力指食物如何从变形中恢复的比率,弹力的大小取决于形变所需的能量,其数学定义为可恢复功和压缩功的比值,

得到一个 0 到 1 之间的值。从图 6 中看出, 未二次水浴处理组的淀粉凝胶弹力随预水热处理时间的增加而显著增大, 且 60 °C 加热的马铃薯淀粉凝胶弹力大于 59 °C 处理组, 其中凝胶弹力最小值 0.04, 最大值为 0.23, 其他样品凝胶弹力值分布在 0.04 至 0.23 之间。相反的, 经二次水浴加热处理的淀粉凝胶弹力随预水热处理时间的延长而呈减小趋势, 其中最大值为 0.38, 最小值为 0.26。马铃薯淀粉凝胶弹力随预水热加热时间的变化趋势与其凝胶强度的变化趋势一致。

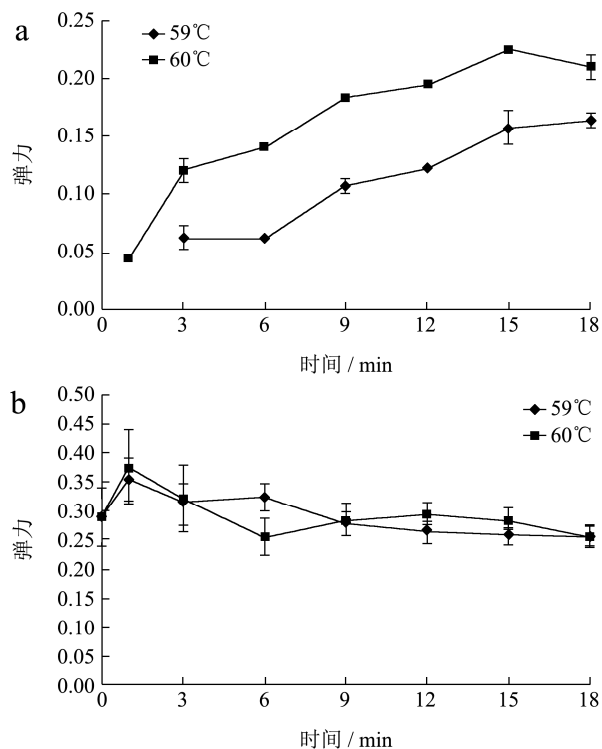


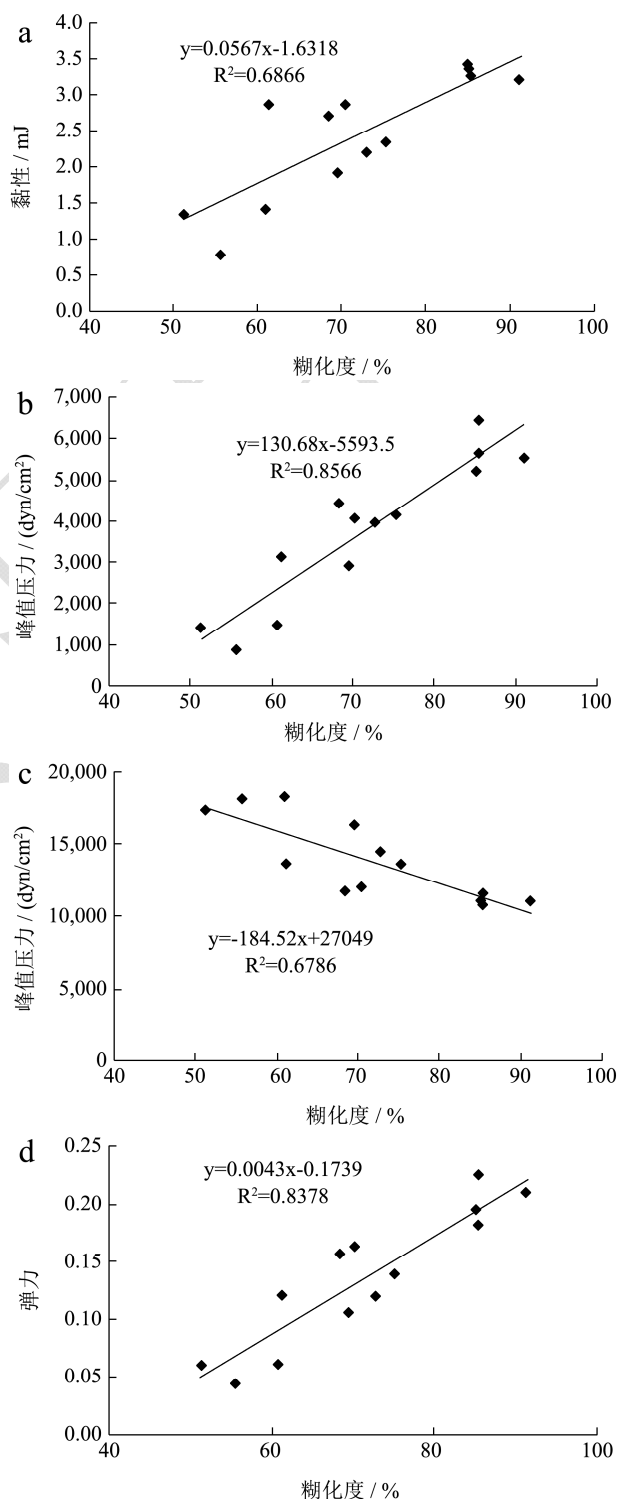
图 6 未二次加热 (a) 和经二次加热 (b) 马铃薯淀粉凝胶弹力随预水热处理时间的变化

Fig.6 Gel resilience of potato starch as a function of pre-hydrothermal treatment time without (a) and with (b) re-heating

2.6 马铃薯淀粉糊化度与其黏度、凝胶强度及弹力相关性分析

利用 SPSS 对两组数据间分别进行了显著性差异检验 (t-test), 显著性检验结果 P 值均小于 0.01, 即表明马铃薯淀粉糊化度与其物化特性指标 (淀粉糊黏度、凝胶强度、凝胶弹力) 间在 0.01 显著性水平下显著相关。由图 7a 可以看出, 随着马铃薯淀粉糊化度的增大, 马铃薯淀粉糊的黏度显著增加, 呈显著正相关。未经二次加热处理的样品其凝胶强度和弹力随糊化度

的增大而逐渐增加, 也呈显著正相关 (图 7b、d)。但是经二次加热完全糊化后的马铃薯淀粉凝胶强度和弹力随原料糊化度的增大而显著降低, 呈显著负相关 (图 7c、e)。双变量相关性分析的结果进一步验证了马铃薯淀粉的糊化度与其黏度、凝胶强度、凝胶弹力存在显著的线性相关性, 可以通过糊化度的变化预测马铃薯淀粉这些物化特性指标的变化。



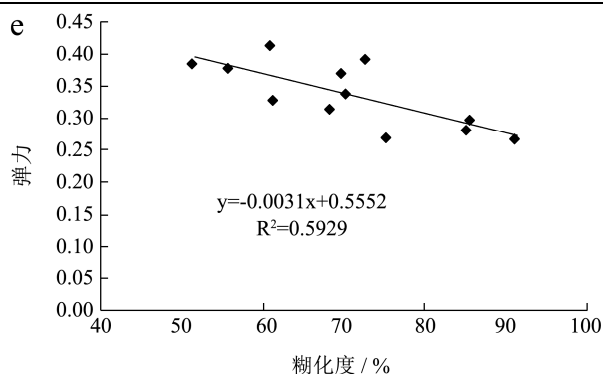


图7 马铃薯淀粉糊化度与其黏度及凝胶特性相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between degree of potato starch gelatinization and its viscosity and gelling properties

注: a: 淀粉糊黏性; b: 未二次加热淀粉凝胶峰值压力;

c: 二次加热后淀粉凝胶峰值压力; d: 未二次加热淀粉凝胶弹力; e: 二次加热后淀粉凝胶弹力。

3 结论

本研究结果表明, 马铃薯淀粉(料液比 1:9)通过不同温度(59 ℃, 60 ℃), 时间(1~18 min)的水热处理可以得到糊化度在 38.7%~91.1%之间的样品, 且随着水热温度的升高及时间的延长, 其糊化度显著增大。预糊化的马铃薯淀粉糊样品黏度测定结果表明, 随水热温度升高及时间的延长, 样品黏度显著增大。显微镜观察可以发现, 随着水热温度升高及时间的延长, 马铃薯淀粉颗粒逐渐破裂, 原有的椭圆形特征形貌逐渐消失。未经二次加热的淀粉凝胶强度和凝胶弹力随水热温度升高及时间延长而逐渐增大。但是, 经二次加热后的淀粉凝胶强度和弹力随水热温度升高及时间的延长而显著降低。相关性分析结果表明, 马铃薯淀粉黏度、凝胶强度、凝胶弹力与其糊化度存在显著的线性相关性。本研究结果可为预糊化马铃薯淀粉的加工及应用提供数据支持, 下一步将继续深入探究预糊化马铃薯淀粉在凝胶形成过程中的结构变化, 阐明其凝胶强度随糊化度变化的分子机制。

参考文献

- [1] Jaspreet Singh, Narpinder Singh. Studies on the morphological, thermal and rheological properties of starch separated from some Indian potato cultivars [J]. Food Chemistry, 2001, 75(1): 67-77
- [2] 张攀峰. 不同品种马铃薯淀粉结构与性质的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012
- [3] 刘小晶. 三种马铃薯淀粉颗粒结晶结构的定性定量研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012
- [4] LIU Xiao-jing. Qualitative and quantitative research on crystalline structure of three kinds of potato starches [D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2012
- [5] Miyazaki Megumi, Maeda Tomoko, Morita Naofumi. Bread quality of frozen dough substituted with modified tapioca starches [J]. European Food Research and Technology, 2008, 227(2): 503-509
- [6] Calvin Onyango, Christopher Mutungi, Günter Unbehend, et al. Rheological and textural properties of sorghum-based formulations modified with variable amounts of native or pregelatinised cassava starch [J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 44(3): 687-693
- [7] Changfeng Xue, Noboru Sakai, Mika Fukuoka. Use of microwave heating to control the degree of starch gelatinization in noodles [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 87(3): 357-362
- [8] Rini Yulianingsih, Shoichi Gohtani. Dispersion characteristics of pregelatinized waxy rice starch and its performance as an emulsifier for oil-in-water emulsions: Effect of gelatinization temperature and starch concentration [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 476-486
- [9] Wang Hongwei, Xiao Naiyong, Wang Xintian, et al. Effect of pregelatinized starch on the characteristics, microstructures, and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 248-256
- [10] 郭玉. 预糊化淀粉的制备及其在冷冻面条中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013
- [11] GUO Yu. Modification of the preparation of pre-gelatinized starch and its application for frozen noodles [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013
- [12] Zong-qiang Fu, Li-ming Che, Dong Li, et al. Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 66: 324-331
- [13] Zong-qiang Fu, Li-jun Wang, Dong Li, et al. Effects of partial gelatinization on structure and thermal properties of corn starch after spray drying [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(4): 1319-1325
- [14] 石磊. 颗粒度及糊化度对玉米面团理化性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014
- [15] SHI Lei. Effects of particle size and gelatinization on the physicochemical properties of corn dough [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014

- [13] Zong-qiang Fu, Li-jun Wang, Hui Zou, et al. Studies on the starch-water interactions between partially gelatinized corn starch and water during gelatinization [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101: 727-732
- [14] Ebrahim Taghinezhad, Mohammad Hadi Khoshtaghaza, Saeid Minaei, et al. Relationship between degree of starch gelatinization and quality attributes of parboiled rice during steaming [J]. Rice Science, 2016, 23(6): 339-344
- [15] 张美霞, 琚争艳, 阚建全. 超微全藕粉与藕淀粉颗粒结构的比较研究[J]. 食品科学, 2009, 30(7): 83-86
ZHANG Mei-xia, JU Zheng-yan, KAN Jian-quan. Comparison analysis of granule structure between lotus starch and super-fine whole lotus powder [J]. Food Science, 2009, 30(7): 83-86
- [16] 荣建华, 许金东, 张正茂, 等. 小麦淀粉润胀过程中颗粒性质的研究[J]. 食品科学, 2006, 12: 217-220
RONG Jian-hua, XU Jin-dong, ZHANG Zheng-mao, et al. Study on granular properties of wheat starch during swelling process [J]. Food Science, 2006, 12: 217-220
- [17] Min Cui, Ling Fang, Hongxian Zhou, et al. Effects of amino acids on the physicochemical properties of potato starch [J]. Food Chemistry, 2014, 151: 162-167
- [18] 郭泽航, 余子香, 迪珂君, 等. 高压均质对板栗淀粉糊化、流变及质构特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(17): 91-97
GUO Ze-hang, YU Zi-xiang, DI Ke-jun, et al. Effect of high pressure homogenization on gelatinization, rheology, texture and polarization characteristics of chestnut starch [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(17): 91-97
- [19] 张正茂, 周颖. 5 种豆类淀粉凝胶特性的比较研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 38-44
ZHANG Zheng-mao, ZHOU Ying. Comparative study on starch gel properties of five kinds of legumes [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(3): 38-44
- [20] 张正茂, 阚玲. 不同来源淀粉凝胶质构特性的比较研究[J]. 食品科技, 2017, 42(7): 216-222
ZHANG Zheng-mao, KAN Ling. Comparative study on gel textural properties of starch from different sources [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(7): 216-222
- [21] Hyun-Jung Chung, Xiu-Qing Li, Danusha Kalinga, et al. Physicochemical properties of dry matter and isolated starch from potatoes grown in different locations in Canada [J]. Food Research International, 2014, 57, 89-94
- [22] A Gryszkin, T Zięba, M Kapelko, et al. Effect of thermal modifications of potato starch on its selected properties [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 122-127
- [23] 郭瑾. 不完全糊化淀粉的流变特性及凝胶特性的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019
GUO Jin. Study on rheological properties and gel properties of insufficient gelatinization starch [D]. Xi'an: Shanxi University of Science and Technology, 2019
- [24] Lovedeep Kaur, Narpinder Singh, Navdeep Singh Sodhi. Some properties of potatoes and their starches II. morphological, thermal and rheological properties of starches [J]. Food Chemistry, 2002, 79(2): 183-192
- [25] Ting-Ting Huang, Da-Nian Zhou, Zheng-Yu Jin, et al. Effect of repeated heat-moisture treatments on digestibility, physicochemical and structural properties of sweet potato starch [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 202-210

(上接第 21 页)

- [19] Zhu J, Zhuang P, Luan L, et al. Preparation and characterization of novel nanocarriers containing krill oil for food application [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19(B): 902-912
- [20] 金栋, 胡荣峰, 周安, 等. 灵芝孢子油自微乳的制备及其质量评价[J]. 安徽中医药大学学报, 2017, 6(36): 89-92
JIN Dong, HU Rong-feng, ZHOU An, et al. Preparation and quality evaluation of *Ganoderma* spore oil self-microemulsion [J]. Journal of Anhui University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 6(36): 89-92
- [21] 李学民. 维生素 A 牛至油大蒜素复合纳米乳的研制与应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
LI Xue-min. Studies on the nanoemulsion preparation with vitamin A, oregano oil and allicin [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015
- [22] 张文娟. 禽用复合维生素纳米乳的研制及其功效评价[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2010
ZHANG Wen-juan. Development and efficacy evaluation of composite vitamin nanoemulsion for poultry [D]. Shanxi: Northwest A&F University, 2010