

贾淑玉, 张百汝, 李杰, 等. 湿热处理对山药粉理化及结构性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 22–26. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050238

JIA Shuyu, ZHANG Bairu, LI Jie, et al. Effect of Heat Moisture Treatment on Physicochemical and Structural Properties of Yam Flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 22–26. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050238

· 研究与探讨 ·

湿热处理对山药粉理化及结构性质的影响

贾淑玉^{1,2}, 张百汝^{1,2}, 李杰^{1,2}, 崔波^{1,2}, 于滨^{1,2,*}

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)生物材料及绿色造纸国家重点实验室, 山东济南 250353;

2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)食品科学与工程学院, 山东济南 250353)

摘要: 为了研究湿热处理对山药粉理化及结构性质的影响, 在 90 和 110 °C 下, 分别对水分含量 15%、25% 和 35% 的样品进行 9 h 湿热处理, 并对处理后的山药粉进行了溶胀性、糊化特性、热力学特性、结晶程度以及红外光谱的测定。结果表明, 湿热处理使山药粉溶解度增加, 在处理条件为 90 °C 水分含量 25% 时, 溶解度升至 9.88%, 而膨胀力由 3.90 g/g 降至 3.12 g/g。湿热改性山药粉糊化温度显著升高 ($P < 0.05$), 但其峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度和回生值较原山药粉都显著降低 ($P < 0.05$), 糊化焓值呈上升趋势。湿热处理使山药粉结晶度由 23.5% 升至 27.22%, 但晶型仍为 C 型。红外光谱图表明, 湿热处理使山药淀粉的短程有序结构轻微改变。湿热处理是一种有效改善山药粉理化性质的方法。

关键词: 山药粉, 湿热处理, 糊化性质, 热力学特性, 结晶性质

中图分类号: TS23

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)07-0022-05

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050238

Effect of Heat Moisture Treatment on Physicochemical and Structural Properties of Yam Flour

JIA Shuyu^{1,2}, ZHANG Bairu^{1,2}, LI Jie^{1,2}, CUI Bo^{1,2}, YU Bin^{1,2,*}

(1. State key Laboratory of Biobased Material and Green Papermaking, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China;

2. College of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

Abstract: In order to study the effect of heat moisture treatment on the physicochemical and structural properties of yam flour, the samples with moisture content of 15%, 25% and 35% were subjected to 9 h heat moisture treatment under 90 and 110 °C conditions, respectively. The swell ability, gelatinization characteristics, thermodynamic properties, crystallization degree and infrared spectrum of the yam flour after treatment were measured. The results showed that heat moisture treatment increased the solubility of yam flour. When the processing conditions were 90 °C and 25% moisture content, the solubility increased to 9.88%, and the swelling power decreased from 3.90 g/g to 3.12 g/g. The gelatinization temperature of the heat moisture treatment yam flour increased significantly ($P < 0.05$), but its peak viscosity, trough viscosity, breakdown and setback were all significantly ($P < 0.05$) lower than those of the native yam flour, and the gelatinization enthalpy value showed an upward trend. The heat moisture treatment increased the crystallinity of yam flour from 23.5% to 27.22%, while the crystal form was still C-type. Infrared spectra showed that the short-range ordered structure of yam starch was slightly changed by heat moisture treatment. Heat moisture treatment is an effective method to improve the physicochemical properties of yam powder.

Key words: yam flour; heat moisture treatment; pasting property; thermal characteristics; crystallization properties

收稿日期: 2020-05-22

基金项目: 山东省 2017 年度农业重大应用技术创新项目 (SF1405303301); 泰山学者工程专项基金。

作者简介: 贾淑玉 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉及其衍生物, E-mail: jiashuyu123456@163.com。

* 通信作者: 于滨 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: ybqlut@163.com。

山药别名薯蓣,主要分布于我国安徽、河南、江苏、浙江、山东等地^[1]。山药营养成分丰富,主要含淀粉、蛋白质、粗纤维以及钙磷钾等人体所需成分,具有健脾养胃、益肺止咳等功效^[2]。由于山药具有极高的食用和药用价值,山药粉成为食品工业的功能性原料。添加紫山药粉的小麦面包与普通面包的消化性存在差异,面包中的抗性淀粉含量由 34.9% 升高至 41.3%,糊化性能提高^[3]。鲁玉凤等^[4]研究了挂面中添加山药粉对挂面品质的影响,结果表明添加 12% 的山药粉后可改善挂面的品质,表现为挂面吸水率先增后减,烹煮损失呈先减后增再减的趋势,这与山药粉中的淀粉及蛋白有关。为了更好地适应食品加工的需要,对山药粉进行改性处理对山药加工食品具有重要意义。目前常用的粉体改性方法主要包括湿热^[5]、压热^[6]、退火^[7]、挤压等^[8],这些方法只对样品的理化性质产生影响,而不会影响产品的安全性,因此在食品行业深受欢迎^[9]。湿热处理是在低湿环境下设置温度高于糊化温度处理粉体的一种物理处理方法^[10]。湿热处理具有成本低、无残留的优点^[11],因此研究人员对其开展了广泛深入的研究。李明菲^[12]研究了湿热处理对小麦粉基本理化特性影响,发现湿热处理后小麦粉糊黏度降低,糊化温度升高,热糊稳定性提高。闫巧珍等^[13]以马铃薯全粉为原料,证实湿热处理后马铃薯全粉的溶解度升高,且当水分含量 30% 时,溶解度最高。可见湿热处理对全粉的性质影响较大。

山药粉虽有较高的营养价值,但其加工特性受淀粉成分影响大,存在易回生、热不稳定性等缺点;此外山药粉的溶解度低;这些不足限制了山药粉在食品加工中的应用^[14]。而湿热处理可以通过水热作用使内部分子发生迁移,来影响山药成分的结构和理化性质。这种方法安全可靠,适用于食品生产。虽然马铃薯粉、大米粉的湿热处理已有大量文献报道,但山药粉的改性处理少有研究,且主要集中在制备方法方面。故本研究采用不同湿热处理条件对山药粉进行改性,通过分析湿热处理后的山药粉的溶解性、溶胀性、糊化特性、热力学特性及结构特性的变化,探索湿热改性在山药粉中应用的可能性,以期山药粉加工奠定一定的理论基础,为农产品粉体加工提供思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

铁棍山药 产于山东菏泽,含水量 70%,购买于济南市长清区;溴化钾 光谱纯,国药集团化学试剂有限公司。

GFL-70 电热鼓风干燥箱 天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司;LGJ-10 真空冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司;HE53/02 水分测定仪 梅特勒-托利多仪器有限公司;XRD-6000 X 射线粉末衍射仪 日本理学公司;TDL-5-A 离心机 上海安亭

科学仪器厂;FT-IR Spectrometer 红外光谱仪 PerkinElmer 公司;RVA-TecMaster 快速粘度分析仪 瑞典波通仪器公司;DSC-214 差式扫描量热仪 德国 NETZSCH。

1.2 实验方法

1.2.1 山药粉的制备 为保留较完整的营养成分,排除干燥方法对试验的影响,选用冷冻干燥处理样品。取新鲜的山药削皮、切片、清洗、预冷冻过夜。置于真空冷冻干燥机中,设置冷阱温度 -40°C ,冻干 48 h。研磨,过 80 目筛,备用。

1.2.2 山药粉湿热处理 调节山药粉水分含量分别为 15%、25%、35%,转移至玻璃罐密封、 4°C 平衡 24 h。平衡后的密封玻璃罐分别置于 90 和 110°C 电热鼓风干燥箱加热 9 h 进行湿热处理。经湿热处理的山药粉 40°C 干燥过夜,研磨粉碎,过 80 目筛,备用。

1.2.3 溶解度与膨胀力 取原山药粉与湿热处理山药粉于 50 mL 离心管中,制成 10% 的悬浮液, 60°C 水浴 30 min。之后 4000 r/min 离心 20 min,取离心后上清液,倒入称重后的培养皿中, 105°C 干燥至恒重,同时称量离心管中沉淀质量。按以下公式计算溶解度与膨胀力:

$$SA = \frac{A}{W} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$SP = \frac{P}{W(1-SA)} \quad \text{式 (2)}$$

式中,SA 为溶解度(%);SP 为膨胀力(g/g);A 为上清液恒重(g);W 为样品质量(g);P 为沉淀质量(g)。

1.2.4 糊化特性分析 利用快速粘度分析法进行测定,参考 Cahyana 等^[15]的方法,稍作修改。2.5 g 样品放入铝筒,加入 25 g 蒸馏水,设置程序,在 50°C 保持 1 min,以 $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 加热至 95°C ,然后在 95°C 保持 2 min。随后在 3 min 内将其冷却至 50°C 保持 2 min,测定样品。

1.2.5 热力学性质分析 利用差示扫描量热法进行分析,根据 Ahn 等^[16]的测定方法,稍作修改。将 3.0 mg 样品放入坩埚中,加入蒸馏水,样品与蒸馏水比例为 1:4,室温下密封平衡过夜,确定湿热处理山药粉的起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)、热焓值(ΔH)。

1.2.6 结晶性质分析 利用 X-射线粉末衍射仪测定山药粉晶体性质,设置衍射角扫描区域为 4° ~ 40° ,扫描速度为 $2^{\circ}/\text{min}$ 。

1.2.7 结构特性分析 利用红外光谱表征湿热处理对山药粉结构特性的影响,参考张丽芳等^[17]的测定方法,稍作修改。干燥的山药粉与干燥溴化钾以 1:100 的比例混合,于玛瑙研钵中充分研磨。研磨好的混合物倒入压片模具,压片,取出后红外扫描。扫描范围

为 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$, 分辨率为 4 cm^{-1} , 进行样品测定。

1.3 数据处理

采用 SPSS 20 和 Origin 8.5 分析软件对实验测定的数据进行分析 and 图表制作, 各数据重复测定两次。

2 结果与分析

2.1 湿热处理对山药粉溶解度与膨胀力的影响

湿热处理对山药粉溶解度与膨胀力产生影响, 其变化趋势见图 1。湿热处理之后山药粉的溶解度呈现上升趋势, 水分含量 25% 的山药粉 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 9 h 后, 其溶解度变化最大, 由 6.00% 升高至 9.88%, 而膨胀力由 3.90 g/g 降至 3.12 g/g。这可能是由于发生了水热作用, 山药淀粉的部分直链淀粉与水分子结合, 淀粉颗粒膨胀破裂。同时直链淀粉与支链淀粉之间、直链淀粉之间以及淀粉分子之间的键会发生断裂重排, 使得山药粉的溶解度升高^[18]。随着水分含量和加热温度的改变, 湿热处理的山药粉较原山药粉膨胀力降低, 15% 水分含量的山药粉经 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理 9 h 后, 其膨胀力降至最低(3.09 g/g)。但不同处理条件下的山药粉膨胀力差异不明显。膨胀力的降低与淀粉分子颗粒内部的双螺旋结构有密切联系。湿热处理后, 分子间双螺旋结构更加稳定, 这在 DSC 结果中焓值的提高有所体现。并且淀粉直链淀粉与支

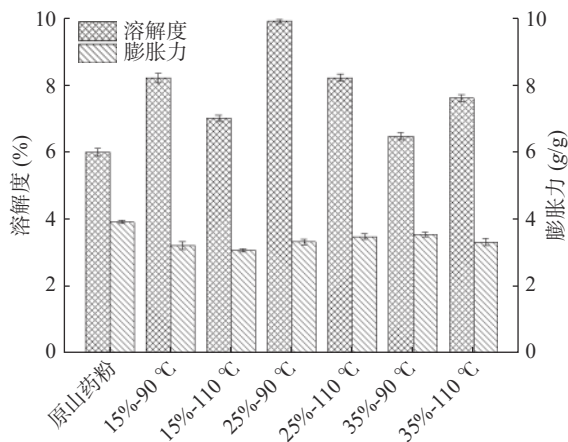


图 1 湿热处理对山药粉溶解度和膨胀力的影响

Fig.1 Effects of heat moisture treatment on solubility and swelling power of yam flour

链淀粉之间的相互作用逐渐增强, 颗粒内部的分子间作用力增加, 限制了山药粉的膨胀^[19]。同时, 山药粉蛋白质会与淀粉分子形成蛋白质-淀粉复合物, 也会阻碍膨胀, 降低膨胀力, 这与闫巧珍等^[13,20]关于马铃薯淀粉的研究报道一致。

2.2 糊化性质分析

山药粉的糊化性质由 RVA 测得, 其数据见表 1。与原山药粉相比, 湿热处理山药粉的峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度以及回生值均显著下降 ($P<0.05$)。但随温度和水分的变化, 各黏度之间的差异不大。Puncha-Arnon 等^[21]研究表明大米全粉也有相似结果。山药粉峰值黏度的降低可能与其内部淀粉结构的加强密切相关。湿热处理后, 淀粉颗粒内部分子链缔合, 双螺旋分子链解体重排形成更紧密的结构。同时直链淀粉与支链淀粉相互作用增强, 内部结晶结构增多, 峰值黏度降低^[22]。山药中除淀粉成分外, 粘蛋白和脂类的含量也是不容忽视的。山药粉经过湿热处理后, 蛋白质与脂质同淀粉分子形成复合物也降低了峰值黏度^[22]。崩解值是指峰值黏度与谷值黏度的差值, 其数值的大小反映了样品热稳定的强弱。崩解值越大, 表明样品越适用于需长时间高温处理的工序。湿热处理后, 山药粉的崩解值由 232.50 cP 急剧降至 10 cP 以下, 说明山药粉的热稳定性显著提高 ($P<0.05$)。此外, 山药粉的回生值在湿热处理后也显著降低 ($P<0.05$), 这与其内部淀粉的稳定性相关, 说明处理后山药粉中的淀粉不易老化。这些变化使得山药粉的热稳定性提高, 更利于食品生产。

2.3 热力学特性分析

不同水分含量山药粉经不同温度的湿热处理后, 其热力学特性的影响见表 2。湿热处理后的山药粉糊化开始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、糊化终了温度 (T_c) 以及糊化焓值都呈上升趋势。 T_0 是衡量结晶程度的指标, T_0 升高说明处理后的山药粉的结晶更加有序^[22]。 T_p 的变化则与直链淀粉与支链淀粉的作用程度有关, 直链淀粉与支链淀粉之间的作用力越大, 峰值温度越高, 反映了淀粉结构的稳定性能^[23]。由表 2 所示, 湿热处理在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 随着水分含量的增加, 山药粉的糊化温度有所升高, 这表明水分含量能够影响山药粉中淀粉链间的相互作用, 提高山药粉的

表 1 湿热处理对山药粉糊化特性的影响

Table 1 Effects of heat moisture treatment on gelatinization characteristics of yam flour

处理条件	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)
原山药粉	1486.50±125.16 ^a	1254.00±83.44 ^a	232.50±41.72 ^a	1495.00±141.42 ^a	241.00±57.98 ^a
15%-90 °C	112.50±0.71 ^b	110.00±1.41 ^b	2.50±0.71 ^b	167.50±3.54 ^b	57.50±2.12 ^b
15%-110 °C	43.50±2.12 ^b	41.50±2.12 ^{bc}	2.50±0.71 ^b	52.50±2.12 ^b	11.00±1.41 ^b
25%-90 °C	98.00±4.24 ^b	94.50±3.54 ^{bc}	3.50±0.71 ^b	139.00±5.66 ^b	44.50±2.12 ^b
25%-110 °C	27.00±4.24 ^b	25.00±4.24 ^c	2.00±0.00 ^b	36.00±5.66 ^b	11.00±1.41 ^b
35%-90 °C	60.00±0.00 ^b	53.00±0.00 ^{bc}	7.00±0.00 ^b	93.50±0.71 ^b	40.50±0.71 ^b
35%-110 °C	23.00±1.41 ^b	21.50±2.12 ^c	1.50±0.71 ^b	33.00±0.00 ^b	11.50±2.12 ^b

注: 同列数据后附不同字母者表示差异显著 ($P<0.05$)。表 2 同。

表 2 湿热处理对山药粉热力学特性的影响
Table 2 Effects of heat moisture treatment on the thermal characteristics of yam flour

处理条件	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
原山药粉	77.70±1.70 ^d	85.35±0.07 ^f	87.65±0.07 ^d	1.59±0.05 ^b
15%–90 °C	81.00±1.27 ^e	86.90±0.57 ^e	90.15±1.48 ^e	1.65±0.21 ^b
15%–110 °C	85.65±1.06 ^b	88.70±0.14 ^d	93.50±0.57 ^b	1.80±0.16 ^a
25%–90 °C	83.20±0.42 ^e	87.45±0.35 ^e	91.65±0.35 ^e	1.78±0.04 ^a
25%–110 °C	87.70±0.85 ^b	93.45±0.07 ^b	97.90±0.28 ^a	1.61±0.19 ^b
35%–90 °C	86.80±0.14 ^b	90.05±0.07 ^e	93.65±0.07 ^b	1.67±0.08 ^b
35%–110 °C	90.40±0.28 ^a	95.40±0.00 ^a	99.25±0.00 ^a	1.58±0.09 ^b

稳定性。在相同水分条件下, 温度由 90 °C 升高至 110 °C, 其糊化温度显著升高($P<0.05$), 表明了温度对山药粉的糊化温度影响较大。特别是在 35%–110 °C 的条件下, T_o 、 T_p 、 T_c 分别升高了 12.70、10.05、11.6 °C, 山药粉热稳定性明显提高。这与山药粉崩解值的变化一致。焓值 ΔH 的升高同样与淀粉颗粒内部结构的变化有关。湿热处理过程中淀粉颗粒的结晶区双螺旋结构增多, 有序的双螺旋结构解体需要能量, 可能导致焓值的升高^[24], 刘星等^[25] 对薏仁米淀粉的研究也有相似报道。

2.4 X 射线粉末衍射图谱分析

湿热处理山药粉的 X 射线衍射图谱如图 2 所示。由图 2 可知, 湿热处理后的山药粉的特征衍射峰与原山药粉的特征峰均出现在 $2\theta=15.3$ 、 17.3 、 23.5 °处, 峰型无明显差异, 这表明经过处理后山药粉中淀粉分子的结晶结构没有发生变化, 依然保持 C 型结晶结构^[15]。但是湿热处理后, 山药粉的结晶度升高, 这表明湿热处理能够影响山药粉的晶体结构^[26]。经湿热处理之后山药粉的结晶度增加, 水分含量为 25% 的山药粉经 90 °C 湿热处理后, 其结晶度达到 27.22%, 明显高于原山药粉的结晶度(23.50%), 这与傅立叶红外光谱分析中 $1045\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的峰强度比值数据保持一致。这可能是因为 在 25%–90 °C 处理, 湿热处理形成的结晶最多, 但其结晶稳定程度较弱, 升温或增湿可能破坏其结晶结构。这也解释了 25%–90 °C 的样品虽然结晶度最高, 但其热稳定性低于 110 °C 的样品和水分 35% 的样品。此外结晶度的升高受淀粉链间相互作用增强的

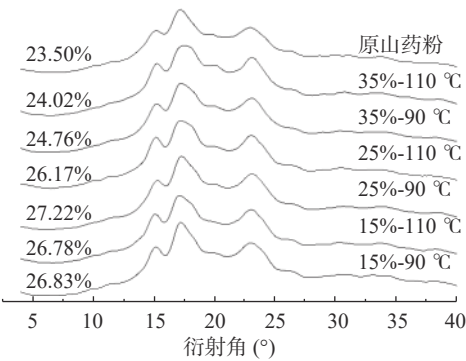


图 2 湿热处理山药粉的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of yam flour with heat moisture treatment

影响, 同时也与淀粉分子和蛋白形成的复合物的稳定性有关。Xiao^[9] 报道的关于苦荞淀粉的湿热处理后结晶性质也有类似的变化。

2.5 红外光谱分析

山药粉的红外谱图见图 3, 与原山药粉相比, 湿热处理后的山药粉峰型基本不变, 没有出现新的吸收峰, 说明湿热处理没有改变山药粉中各成分的一级结构。谱图中 3430 cm^{-1} 处的宽谱带为 -OH 的伸缩振动, 蛋白组分的酰胺 I 和酰胺 II 的谱带分别出现在 1700 和 1450 cm^{-1} 。而淀粉的典型峰则出现在 995 、 1022 、 1047 cm^{-1} 处, 分别与淀粉的水化结晶、非结晶结构以及有序结构有关^[23]。 $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 、 $1022\text{ cm}^{-1}/995\text{ cm}^{-1}$ 这两个峰强度比值可以用来反映淀粉短程结构的变化^[27], 前者比值与结晶度成正比, 而后者比值与淀粉的有序程度成反比^[19]。淀粉的短程结构是指淀粉分子中由直链淀粉和支链淀粉中的短链部分形成的双螺旋结构。经计算, 原山药粉 $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 的峰强度比值为 0.997, 经湿热处理的山药粉在处理温度 90 °C 时(水分含量分别为 15%、25%、35%)的峰强度比值分别为 0.999、0.995、1.001, 在 110 °C 时的比值为 1.005、0.998、1.000, 这表明湿热处理有利于山药粉结晶度的提高, 这与 XRD 测得的结晶度结果一致。原山药粉 $1022\text{ cm}^{-1}/995\text{ cm}^{-1}$ 的峰强度比值是 0.991, 而处理后的山药粉, 随水分含量升高, 90 °C 的比值分别为 0.997、0.995、0.995, 110 °C 时的比值分别为 0.995、0.994、

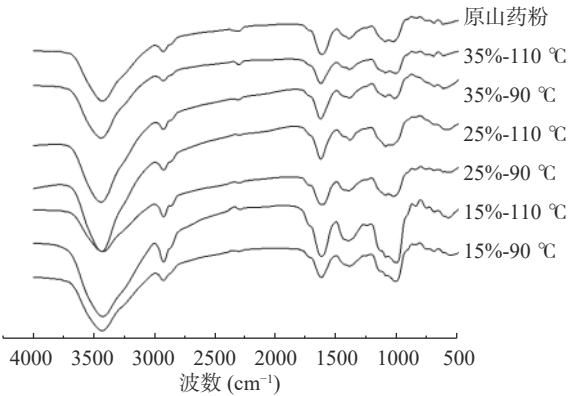


图 3 湿热处理山药粉的红外光谱图

Fig.3 Infrared spectra of yam flour with heat moisture treatment

0.993, 这说明湿热处理虽使山药粉的结晶度升高, 但其整体结构的有序度降低^[28]。

3 结论

湿热处理对山药粉的结构和理化性质有明显影响。湿热处理后, 由于水热作用, 部分直链淀粉溶出, 淀粉链之间发生重排, 导致山药粉的溶解度升高, 膨胀力较原山药粉降低。湿热处理使山药粉峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度以及回生值均显著下降($P<0.05$), 抗回生性提高; 并且湿热处理后的山药粉由于淀粉颗粒内部结构变化, T_o 、 T_p 、 T_c 以及焓值基本呈升高的趋势, 热稳定性显著提高。由此可见湿热处理明显提高了山药粉的溶解度和稳定性。但本研究缺少对山药粉消化特性和颗粒形貌的探究及非淀粉成分对山药粉性质的影响, 下一步工作将会围绕这一方面展开, 这些方面的研究将会对山药加工提供新的机遇。

参考文献

- [1] 黄玉仙. 山药 (*Rhizoma Dioscorea*) 种质资源研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [2] 张娟. 山药营养保健挂面的研制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 11-12.
- [3] 刘霞. 紫山药粉对小麦面包体外淀粉酶消化性的影响 [C]. 中国食品科学技术学会 (Chinese Institute of Food Science and Technology). 中国食品科学技术学会第十五届年会论文摘要集. 中国食品科学技术学会 (Chinese Institute of Food Science and Technology): 中国食品科学技术学会, 2018: 806-807.
- [4] 鲁玉凤, 屈慧如, 罗博文, 等. 山药-小麦粉质构特性及挂面品质研究 [J]. 农产品加工, 2019(17): 24-26, 29.
- [5] Vu T H, Bean S, Hsieh C F, et al. Changes in protein and starch digestibility in *Sorghum* flour during heat-moisture treatments [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(14): 4770-4779.
- [6] Zhang F, Zhang Y Y, Thakur K, et al. Structural and physicochemical characteristics of *Lycoris* starch treated with different physical methods [J]. *Food Chemistry*, 2019, 275: 8-14.
- [7] Molavi H, Razavi S M A, Farhoosh R. Impact of hydrothermal modifications on the physicochemical, morphology, crystallinity, pasting and thermal properties of acorn starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 385-393.
- [8] 刘琳. 球磨和湿热处理对淀粉结构和理化性质的影响 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- [9] Xiao Y, Liu H, Wei T, et al. Differences in physicochemical properties and *in vitro* digestibility between tartary buckwheat flour and starch modified by heat-moisture treatment [J]. *LWT*, 2017, 86: 285-292.
- [10] Dwi Rukmi Putri W, Zubaidah E, Widya Ningtyas D. Effect of heat moisture treatment on functional properties and microstructural profiles of sweet potato flour [J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2014, 6(5): 655-659.
- [11] 林志荣, 高群玉. 淀粉的湿热处理及其发展前景 [J]. *粮食与饲料工业*, 2005(8): 22-23.
- [12] 李明菲. 不同热处理方式对小麦粉特性影响研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [13] 闫巧珍, 高瑞雄, 张正茂, 等. 湿热处理对马铃薯全粉品质的影响 [J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 264-270, 294.
- [14] 金金. 山药制粉加工技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [15] Cahyana Y, Wijaya E, Halimah T S, et al. The effect of different thermal modifications on slowly digestible starch and physicochemical properties of green banana flour (*Musa acuminata* Colla) [J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 274-280.
- [16] Ahn J H, Baek H R, Kim K M, et al. Slowly digestible sweetpotato flour: Preparation by heat-moisture treatment and characterization of physicochemical properties [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2013, 22(2): 383-391.
- [17] 张丽芳, 宋洪波, 安凤平, 等. 淮山药淀粉及其抗性淀粉理化性质的比较 [J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(3): 24-29.
- [18] Silva W M F, Biduski B, Lima K O, et al. Starch digestibility and molecular weight distribution of proteins in rice grains subjected to heat-moisture treatment [J]. *Food Chemistry*, 2017, 219: 260-267.
- [19] 李涛, 安凤平, 宋洪波, 等. 热处理对紫山药淀粉理化和消化特性的影响 [J]. *福建农林大学学报 (自然科学版)*, 2018, 47(2): 250-256.
- [20] 闫巧珍. 马铃薯全粉理化性质和消化特性的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [21] Puncha-Arnon S, Uttapap D. Rice starch vs. rice flour: Differences in their properties when modified by heat-moisture treatment [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 91(1): 85-91.
- [22] Chen X, He X W, Fu X, et al. *In vitro* digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat-moisture treatment [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 63: 109-115.
- [23] Lu Z H, Donner E, Yada R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 154: 214-222.
- [24] 陈佩, 张晓, 赵冰, 等. 湿热处理对糯小麦淀粉理化性质的影响 [J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(2): 85-89.
- [25] 刘星, 范楷, 司文帅, 等. 谷粒湿热处理对薏仁米淀粉形态、结构与热特性的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 128-133.
- [26] 姚映西, 吴卫国. 湿热改性处理对大米粉性质影响 [J]. *粮食与油脂*, 2016, 29(2): 60-64.
- [27] Yang C H, Zhong F, Douglas Goff H, et al. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends [J]. *Food Chemistry*, 2019, 280: 51-58.
- [28] 李照菡. 湿热处理对板栗淀粉结构及理化性质的影响 [D]. 北京: 北京工业大学, 2016.