

高雪丽, 张梦迪, 王梦赞, 等. 湿热处理对红薯淀粉特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 30–36. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040280

GAO Xueli, ZHANG Mengdi, WANG Mengyun, et al. Effect of Heat-moisture Treatment on the Properties of Sweet Potato Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 30–36. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040280

· 研究与探讨 ·

湿热处理对红薯淀粉特性的影响

高雪丽^{1,2}, 张梦迪¹, 王梦赞¹, 李光辉^{1,2}, 王永辉^{1,2}, 何胜华^{1,2}, 黄继红^{1,2}, 孙溪烽³, 郭卫芸^{1,2,*}

(1. 许昌学院食品与药学院, 河南许昌 461000;

2. 功能食品绿色制造河南省协同创新中心, 河南许昌 461000;

3. 河南省盛田农业有限公司, 河南许昌 461000)

摘要: 为了研究湿热处理对红薯淀粉理化及结构等特性的影响, 以五种红薯淀粉为实验对象, 测定并分析湿热处理后淀粉溶解度、膨润力、持水力、透光率、凝沉性等理化特性的变化情况, 进而探究湿热处理对不同初始含水量红薯淀粉吸水特性及晶体结构的影响规律。结果表明, 经湿热处理后红薯淀粉的溶解度、膨润力、凝沉性与透光率均较原淀粉降低, 持水力均增强, 且五种红薯淀粉均呈现相同趋势, 说明红薯品种与湿热处理对淀粉性质的影响规律无显著相关性。经湿热处理后红薯淀粉未见新的衍射特征峰, 晶体类型仍为 C 型, 而衍射强度和结晶度降低。湿热处理淀粉吸水达到平衡所需要时间较原淀粉短, 且饱和吸水量较原淀粉有减小的趋势。利用 Peleg 模型方程模拟湿热处理后红薯淀粉的吸水规律, 并计算出浸泡动力学吸水常数 K_1 和 K_2 , 确定了淀粉的吸水动力学方程, 可预测湿热处理后红薯淀粉在浸泡过程中的水分含量。

关键词: 湿热处理, 红薯淀粉, 理化性质, 吸水特性

中图分类号: TS205

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)05-0030-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040280

本文网刊:



Effect of Heat-moisture Treatment on the Properties of Sweet Potato Starch

GAO Xueli^{1,2}, ZHANG Mengdi¹, WANG Mengyun¹, LI Guanghui^{1,2}, WANG Yonghui^{1,2}, HE Shenghua^{1,2}, HUANG Jihong^{1,2}, SUN Xifeng³, GUO Weiyun^{1,2,*}

(1. Food and Pharmacy College, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Collaborative Innovation Center of Green Manufacturing of Functional Foods, Henan Province, Xuchang 461000, China;

3. Henan Shengtian Agriculture Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: To explore the effects of heat-moisture treatment on the physicochemical and structural properties of sweet potato starch, five types of sweet potato starch were used as the raw material, and their solubility, swelling power, water holding capacity, transmittance, and sedimentation were determined. Furthermore, the influence of heat-moisture treatment on the water absorption characteristics and crystal structure of sweet potato starch with different initial water contents was explored. The results showed that the solubility, swelling power, sedimentation, and transmittance of the five sweet potato starches treated with heat-moisture were all decreased when compared with the original starch, but their water holding capacity was increased, indicating that both sweet potato varieties and heat-moisture treatment had no significant effect on starch properties. There was no new diffraction characteristic peaks were found in sweet potato starch after heat-moisture treatment, the crystal type of those treated starch remained a C-type structure, but the diffraction intensity and crystallinity were decreased. The time required for the heat-moisture treated starch to reach equilibrium in water absorption was shorter

收稿日期: 2023-05-04

基金项目: 河南省重大科技专项 (201300110300); 河南省高等学校重点科研项目 (22B550017); 河南省高等学校骨干教师项目 (2020GGJS206)。

作者简介: 高雪丽 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品研究及评价, E-mail: gaoxueli83@yeah.net。

* 通信作者: 郭卫芸 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工及食品检测, E-mail: gwy2002@126.com。

than that of the original starch, and the saturated water absorption tended to decrease compared to the original starch. The soaking kinetic constants K_1 and K_2 from the Peleg model equation were calculated, and the water absorption kinetics equation of sweet potato starch after heat-moisture treatment was confirmed, achieving accurate prediction of its water content during the soaking process.

Key words: heat-moisture treatment; sweet potato starch; physico-chemical properties; water absorption characteristics

红薯又称甘薯、地瓜,是一种重要的经济作物,在我国的种植面积和年产量居世界首位。红薯中含多种营养成分和微量元素,具有很高的营养价值和药用价值^[1-2],其中淀粉质量分数高达 30% 左右,是天然淀粉的重要来源。红薯淀粉具有吸水能力强、价格低廉等优点,在食品加工中应用广泛。湿热处理是一种在较低水分含量(通常<40%)条件下进行高温处理,从而诱导淀粉分子重排的物理改性方式^[3-4]。因其仅涉及水分和热能,处理过程中不加入任何化学或生物试剂,无残留,花费少,是一种环境友好型的淀粉改性技术^[5-6]。

目前,湿热处理被广泛应用在植物源淀粉改性方面。例如,Maior 等^[7]研究了湿热处理对玉米淀粉的影响,发现经湿热处理后玉米抗性淀粉含量增加;唐玮泽等^[8]研究了经过多次湿热处理后大米淀粉结构和性质的变化规律,发现随着湿热处理次数的增加,大米淀粉的含水量、溶解度和膨胀力都呈下降趋势;Mathobo 等^[9]综述了湿热处理对谷物、豆类、块茎淀粉性质的影响,表明所有受试淀粉的热特性和功能特性均发生了明显变化;Brahma 等^[10]采用湿热处理马铃薯淀粉,发现淀粉的溶胀性、溶解性和冻融稳定性均低于天然淀粉,且湿热处理直接导致马铃薯抗性淀粉的占比增加;Siwatch 等^[11]研究表明,湿热处理后苋菜淀粉的热稳定性提高,从而提高了其在食品工业中利用率。以上研究表明,湿热处理是一种能够有效改善谷物及薯类淀粉理化性质及功能特性的方法。尽管廖卢艳等^[12]以淀粉回生值为主要指标,采用响应面法优化得到了湿热处理的关键性参数,并得到了较采用原红薯淀粉生产具有更优蒸煮品质、质构品质和感官品质的红薯粉条产品;Oliveira 等^[13]研究了湿热处理对红薯淀粉的影响,发现经处理后红薯淀粉的颗粒发生凝集,平均尺寸减小,粗糙度增加,结晶度下降。但尚未见湿热处理对不同品种红薯淀粉改性影响规律以及经湿热处理后红薯淀粉吸水特性变化规律的相关研究报道。

淀粉的吸水特性会影响加工品质,而淀粉在实际加工利用过程中,往往会涉及到浸泡吸水过程,湿热处理后淀粉的理化性质会发生较大的改变,其吸水特性也会不同^[14-15]。为了全面研究湿热处理对红薯淀粉理化和结构等特性的影响,本研究以五个品种的红薯淀粉为实验对象,研究湿热处理对其溶解度、膨润力、持水力、透光率、凝沉性的影响,进而探明湿热处理对红薯淀粉晶体结构及吸水特性的影响规律,以为红薯淀粉加工产业的发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红薯(品种分别为济薯 26 号、郭香、烟薯 25 号、秦薯 5 号、龙薯 9 号) 由河南省盛田农业有限公司提供;红薯淀粉(二级) 购于山东圣琪生物有限公司;去离子水 实验室自制。

DHG-924385-III 电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司;XMTD-204 电热恒温水浴锅 常州普天仪器制造有限公司;JW-2019HR 台式冷冻离心机 安徽嘉文仪器装备有限公司;UV-7504 紫外可见分光光度计 上海欣茂仪器有限公司;LT3002E 电子天平 常熟市天量仪器有限责任公司;Novano 扫描电子显微镜 美国 FEI 公司;D8-Adrance X-射线能谱仪 德国 Bruker 公司;JY046 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 红薯淀粉的提取及净化 将红薯清洗之后去皮、切块,放入打浆机中打浆,用纱布包住在水里进行揉搓冲洗,过 100 目筛,弃去残渣后将淀粉液静置,待淀粉沉淀完全后弃去上清液,重复清洗 3 遍,最后置于 55 ℃ 电热恒温鼓风干燥箱烘干,磨成粉末备用。

1.2.2 红薯淀粉的湿热处理 分别称取适量五个品种红薯淀粉放入烧杯中,用去离子水调整淀粉含水量为 20%,密封于容器内静置 24 h 平衡水分,将红薯淀粉置于电热恒温鼓风干燥箱中(110 ℃)处理 2 h,后将样品于 45 ℃ 烘箱中干燥 24 h,研磨粉碎并过 100 目筛,即得到湿热处理(HMT)红薯淀粉样品,用于溶解度、膨润力、持水力、透光率、凝沉性指标的测定。

称取一定量红薯淀粉,清洗,45 ℃ 烘箱中干燥 12 h,研磨,过 100 目筛后备用。为探明红薯淀粉初始水分含量对经湿热处理红薯淀粉吸水特性的影响,定量称取五份经干燥处理的红薯淀粉,分别调节水分含量为 0%、20%、25%、30%、35%、40%,按照上述平衡水分、热处理和粉碎方法处理,即得 HMT 红薯淀粉样品,分别记为 HMT-0、HMT-20、HMT-25、HMT-30、HMT-35、HMT-40,用于吸水特性及结构特征分析^[15-16]。

1.2.3 指标测定

1.2.3.1 溶解度及膨润力 准确称取五份各 0.5 g 红薯淀粉,置于 50 mL 离心管中,加蒸馏水至刻度线处,混匀制备成淀粉乳,分别置于 50、60、70、80、90 ℃ 恒温水浴锅中加热糊化 15 min,注意加热时需

要不断振动。将淀粉乳冷却到常温后,以 4000 r/min 离心 20 min,将上清液倒入干燥至恒重的称量皿中,105 ℃ 烘干至恒重,同时称重离心管中沉淀质量。按公式(1)和(2)分别计算淀粉样品的溶解度与膨润力。

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

$$P = \frac{B}{W \times (1 - S)} \quad \text{式 (2)}$$

式中: S 为溶解度(%); P 为膨润力(g/g); A 为上清液恒重(g); W 为样品质量(g); B 为沉淀物湿重(g)。

1.2.3.2 持水力测定 准确称取 2.0 g 红薯淀粉样品,置于 50 mL 离心管中,加入 30 mL 蒸馏水,振荡 1 h 后,4000 r/min 冷冻离心 10 min,倒出上清液并将离心管内的沉淀物倒置 10 min,称取沉淀物的质量。按公式(3)计算淀粉样品的持水力。

$$C = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

式中: C 为持水力(%); M_1 为沉淀物质量(g); M_0 为样品质量。

1.2.3.3 透明度测定 将样品配成 1% 的淀粉乳,取 50 mL 于 100 mL 烧杯中,置沸水中加热 30 min,冷却至室温后,在 650 nm 波长下测定透光率。透明度用分光光度所测透光率(T, %)计,以蒸馏水做参比。

1.2.3.4 凝沉性测定 准确称取 1.0 g 红薯淀粉样品,配制成 10 g/L 淀粉乳,放入沸水浴中加热糊化 15 min,冷却至室温后,取 25 mL 淀粉糊移入 25 mL 量筒中,静置观察上清液体积的变化,每隔一定时间(1、2、4、8、12、24、48 h)记录上层清液体积。按公式(4)计算红薯淀粉的凝沉性。

$$N = \frac{V_1}{V_0} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: N 为凝沉性(%); V_0 为淀粉糊总体积(mL); V_1 为上层清液体积(mL)。

1.2.3.5 吸水特性测定 参照刘子楨等^[17]方法并做修改,称取一定量 HMT-0、HMT-20、HMT-25、HMT-30、HMT-35、HMT-40 样品,在不同条件下浸泡吸水,浸泡温度 40 ℃,浸泡时间分别设定为 20、30、40、50、60、120、180、240、300 min。浸泡结束后,按 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》所述方法测定所得淀粉样品中的水分含量。

采用 Peleg 模型模拟红薯淀粉样品的吸水过程,根据直线的斜率和截距计算出 K_1 和 K_2 ,把 K_1 和 K_2 分别带入 Peleg 方程,即可得到红薯淀粉的浸泡吸水模型。Peleg 模型如公式(5):

$$\frac{t}{(M_t - M_0)} = K_1 + K_2 t \quad \text{式 (5)}$$

式中: K_1 , K_2 : 吸水动力学系数; M_t : t 时间下的水分含量(%); M_0 : 初始水分含量(%); t: 时间(min)。

1.2.3.6 X 射线衍射分析 参考乔昂等^[18]的研究方法并稍加修改,采用 X 射线衍射仪进行结晶特性测定,参数设置: 采用 Cu 靶,石墨单色器,管压 40 kV,电流 30 mA,扫描范围衍射角 2θ 为 $10^\circ \sim 60^\circ$,步宽 0.02° ,扫描速率 $4^\circ/\text{min}$ 。应用 MDL Jade6.5 软件进行分析。

1.3 数据处理

除特别说明,本文所涉及的数据类测定实验均进行 3 次平行,结果取平均值,数据均运用 Excel、SPSS20 和 Origin8 软件进行整理分析并作图。

2 结果与分析

2.1 湿热处理对红薯淀粉溶解度的影响

溶解度反映的是淀粉在糊化后,淀粉中可溶于水的部分所占全部淀粉干重的比值。湿热处理后五种红薯淀粉溶解度变化趋势见图 1。

溶解度对红薯淀粉在食品加工上影响较大,会直接影响淀粉制品在实际生活中的应用^[19]。图 1 为湿热改性前后五种红薯淀粉在 50~90 ℃ 条件下溶解度的变化情况。由图可知,湿热处理前后红薯淀粉的溶解度均随温度的升高而升高。原因是经过湿热处理后,红薯淀粉中的部分直链淀粉与水分子结合度增加,使得淀粉颗粒迅速膨胀和破裂,而且,各类淀粉分子之间作用力发生了断裂重排,从而促使红薯淀粉的溶解度增加^[20-21]。除龙薯 9 号外,其他四个品种的红薯淀粉在湿热处理后溶解度均较原淀粉显著降低($P < 0.05$)。对于大部分红薯品种,由于湿热处理使红薯淀粉中部分支链淀粉水解,导致直链淀粉比例增大;而且,直链淀粉和支链淀粉、直链淀粉和直链淀粉分子之间的结合发生了断裂重排,使颗粒内部的淀粉分子不易溶出,导致其中可利用的水合羟基也随之减少,故湿热处理使红薯淀粉溶解度降低^[22]。

2.2 湿热处理对红薯淀粉膨润力的影响

湿热处理后五种红薯淀粉膨润力变化趋势见图 2。

膨润力能够代表红薯淀粉的持水能力以及颗粒内部分子与水的结合能力^[23],与溶解度等指标共同反映红薯淀粉的水合能力。图 2 为湿热改性前后五种红薯淀粉在 50~90 ℃ 条件下膨润力的变化情况。由图可知,湿热处理后红薯淀粉膨润力较原淀粉明显降低,在 90 ℃ 条件下膨润力变化最大,且五种红薯淀粉均呈现相同趋势。可能是因为湿热处理引起淀粉内部结构重新排列,直链淀粉与支链淀粉间相互作用,从而形成更有序的淀粉簇,使得淀粉分子内部键能变强,双螺旋结构变得更加紧密,使淀粉的致密化程度提高,降低淀粉颗粒膨胀能力^[24]。乔昂等^[18]、刘庆庆等^[19]在糜子淀粉、天麻淀粉的湿热处理研究中也获得了类似的结果。尽管五种红薯淀粉膨润力随温度变化的趋势相同,但变化幅度不同品种

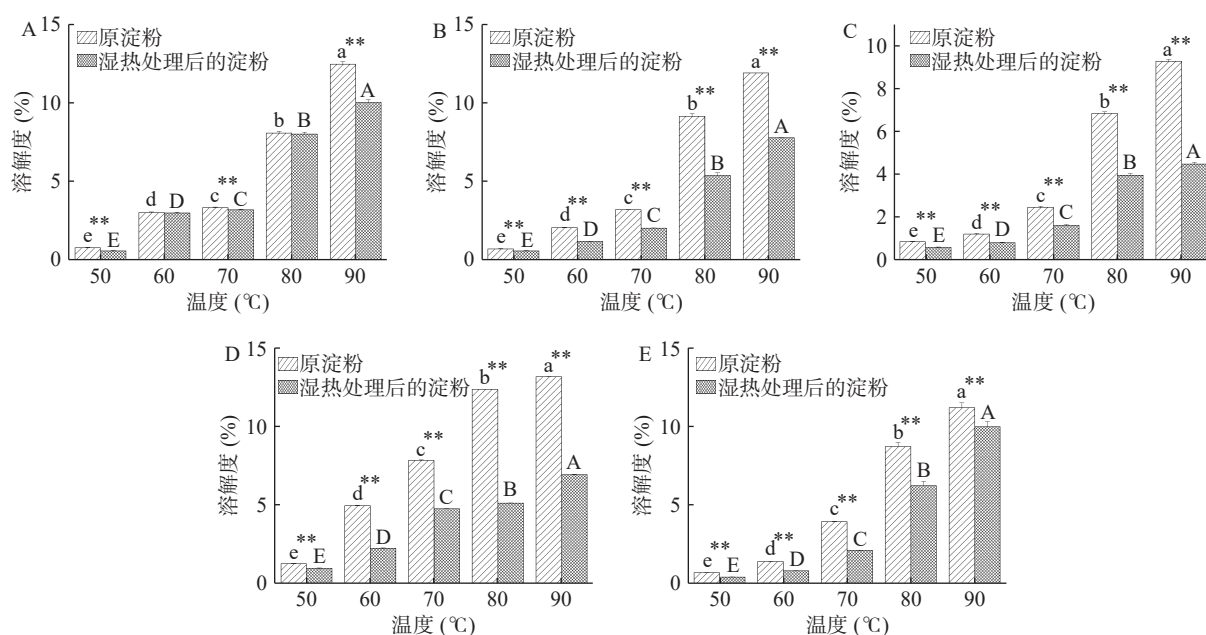


图 1 湿热处理对红薯淀粉溶解度的影响

Fig.1 Effect of heat-moisture treatment on the solubility of sweet potato starch

注: A-龙薯 9 号; B-秦薯 5 号; C-郭香; D-济薯 26 号; E-烟薯 25 号; 不同字母 a~e/A~E 表示不同品种原红薯淀粉/湿热处理红薯淀粉在不同温度之间的差异显著性($P < 0.05$); **表示湿热处理前后红薯淀粉之间具有统计学极显著性差异($P < 0.01$); 图 2 同。

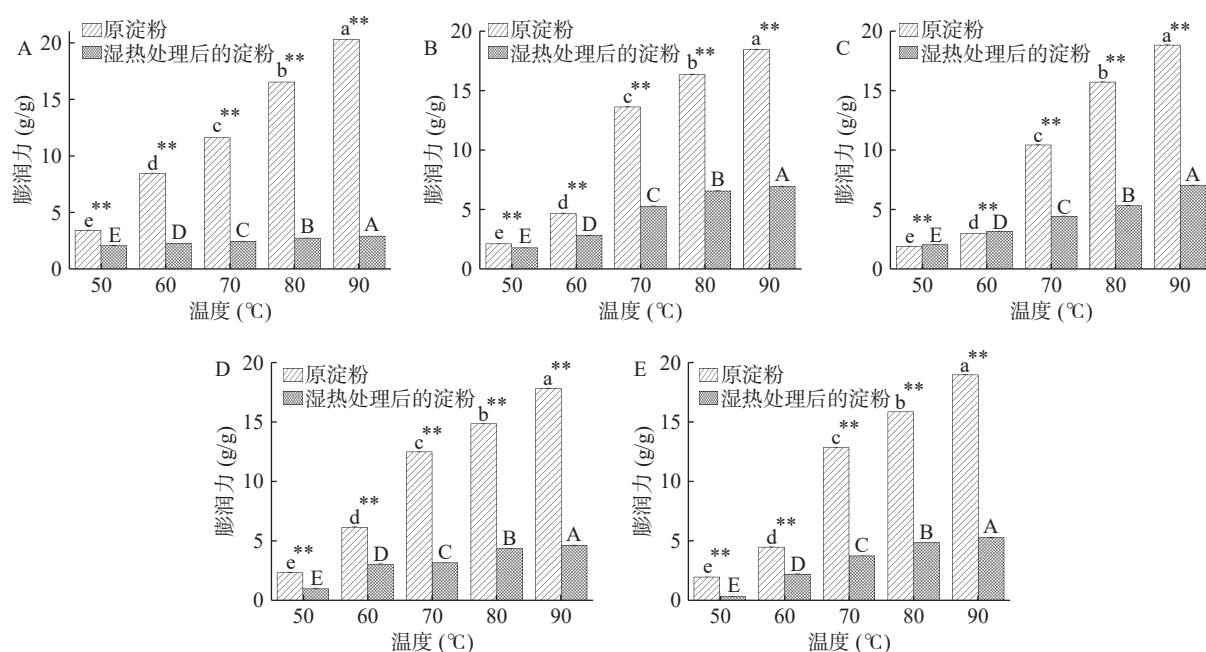


图 2 湿热处理对红薯淀粉膨润力的影响

Fig.2 Effect of heat-moisture treatment on the swelling power of sweet potato starch

之间仍存在差异,其中龙薯 9 号和济薯 26 号两个品种红薯淀粉经湿热处理后膨润力的下降幅度较其他三个品种更为明显。

2.3 湿热处理对红薯淀粉持水力的影响

持水能力反映了淀粉与水的结合程度。淀粉与水混合后,水分子进入淀粉结晶区,与暴露出的羟基形成氢键,淀粉的结构及组成成分对水结合能力有较大影响^[25]。从图 3 中可以看出,五种红薯淀粉经湿热处理后持水力较原淀粉升高,这主要是由于湿热处理使红薯淀粉颗粒中暴露的羟基增多所致^[26]。经湿

热处理后,济薯 26 号、烟薯 25 号红薯淀粉持水力最高,而郭香红薯淀粉持水力最低。不同品种红薯淀粉经湿热处理后持水力增加程度有显著区别,其中济薯 26 号和烟薯 25 号品种红薯淀粉持水力增加程度较大,而郭香品种红薯淀粉持水力对湿热处理的敏感度相对较低。提示在进行湿热处理改性红薯淀粉操作前对红薯品种进行适当筛选非常必要。

2.4 湿热处理对红薯淀粉透光率的影响

淀粉透光率受淀粉种类影响,一般来说,淀粉中直链淀粉含量越高,对光的透射能力越弱,透光率越

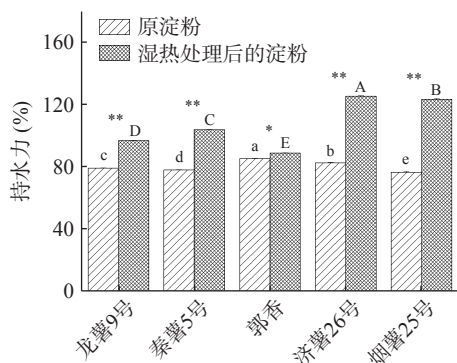


图3 湿热处理对红薯淀粉持水力的影响

Fig.3 Effect of heat-moisture treatment on the water holding capacity of sweet potato starch

注: 不同字母 a~e/A~E 表示不同品种原红薯淀粉/湿热处理红薯淀粉之间的差异显著性 ($P<0.05$); “*”和“**”分别表示湿热处理前后红薯淀粉的统计学显著性差异 ($P<0.05$) 和极显著性差异 ($P<0.01$); 图4~图5同。

低,反映淀粉的透明度越低^[27]。由图4可以看出,湿热处理前后五种红薯淀粉透光率差异显著 ($P<0.05$),其中烟薯25号品种红薯淀粉透光率最高,而秦薯5号红薯淀粉透光率最低。这主要是因为不同红薯淀粉中直链淀粉含量不同,且淀粉颗粒大小也有差异,导致其透光率不同。湿热处理使红薯淀粉透光率显著降低 ($P<0.05$),且五种红薯淀粉均呈现相同趋势,其中济薯26号、郭香、烟薯25号三个品种红薯淀粉经湿热处理后透光率呈极显著差异 ($P<0.01$)。原因可能是湿热处理会使红薯淀粉内部的支链淀粉发生分解,直链淀粉增多,且在湿热处理时可能产生直链淀粉-脂复合物,导致直链淀粉的聚合度升高,透光率降低^[28]。

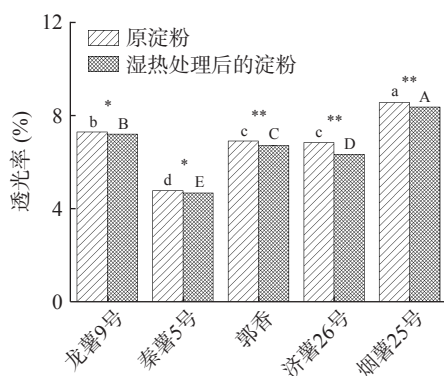


图4 湿热处理对红薯淀粉透光率的影响

Fig.4 Effect of heat-moisture treatment on the light transmittance of sweet potato starch

2.5 湿热处理对红薯淀粉凝沉性的影响

凝沉性是淀粉分子发生重新排列的过程,淀粉种类是影响淀粉凝沉因素之一^[18]。淀粉发生凝沉会导致其相关产品的品质下降,如馒头、面包或加有淀粉的汤类液体放置一段时间后,淀粉凝沉,导致老化,口感变差。由图5可以看出,湿热处理前五种红薯淀粉凝沉性存在显著差异 ($P<0.05$),其中秦薯5号凝沉性值最高,而烟薯25号最低。经湿热处理后,与

原淀粉相比五种红薯淀粉凝沉性均显著下降 ($P<0.05$)。可能的原因是湿热处理后影响红薯淀粉分子间的氢键缔合,使得淀粉颗粒不易凝聚,导致凝沉性降低^[25]。其中龙薯9号、秦薯5号、济薯26号、烟薯25号红薯淀粉均下降幅度较大,湿热处理前后凝沉性差异极显著 ($P<0.01$)。

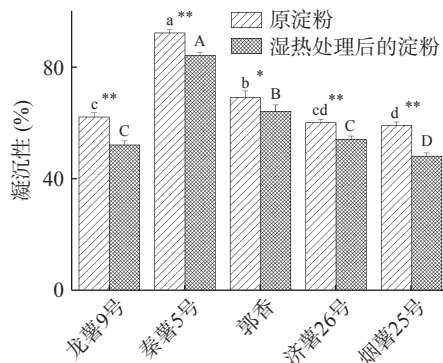


图5 湿热处理对红薯淀粉凝沉性的影响

Fig.5 Effect of heat-moisture treatment on the sedimentation property of sweet potato starch

以上研究表明,经湿热处理后红薯淀粉的溶解度、膨润力、凝沉性与透光率均较原淀粉降低,持水力均增强,且五种红薯淀粉的理化性质变化总体趋势相同,说明红薯品种与湿热处理对淀粉性质的影响规律无显著相关性。淀粉在实际加工利用过程中,往往会涉及到浸泡吸水过程,湿热处理后淀粉的理化性质会发生较大的改变,其吸水特性也会不同,因此后续湿热处理对红薯淀粉吸水特性、颗粒形态及晶体结构的影响规律研究以同种红薯淀粉作为研究材料进行。

2.6 湿热处理对淀粉吸水特性的影响

图6表示不同浸泡时间下红薯淀粉的吸水情况。所有湿热处理淀粉与原红薯淀粉吸水过程均为0~60 min快速吸水,60~300 min吸水速率大幅度减小,趋近水平,这是由于浸泡介质和颗粒之间存在的高水分活度差异,干物质会迅速吸收水分并且发生软化和溶胀^[27]。原淀粉吸水达到平衡所需要时间约为180 min,与原淀粉相比,湿热处理淀粉吸水达到平衡

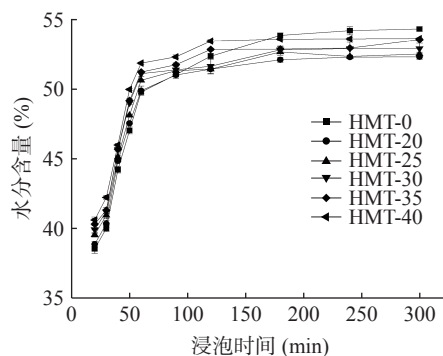


图6 不同浸泡时间下湿热处理红薯淀粉的含水量

Fig.6 Water content of sweet potato starch by heat-moisture treatment under different immersion time

所需要时间约为 120 min, 吸水达到平衡所需要的时间较原淀粉短, 且湿热处理淀粉饱和吸水量较原淀粉有减小的趋势。在相同浸泡时间下, 湿热处理水分含量越高, 所得 HMT 红薯淀粉中的水分含量越高, 如在吸水 60 和 300 min 时, HMT-20、HMT-25、HMT-30、HMT-35、HMT-40 淀粉的含水量分别为 49.9% 和 52.32%、50.64% 和 52.52%、51.12% 和 52.92%、51.23% 和 53.55%、51.87% 和 53.63%。可能是因为湿热处理对能够促使淀粉结构坍塌、晶体破坏, 淀粉分子吸水增多^[28]。因此, 为防止淀粉中颗粒膨胀过度而影响淀粉加工品质, 应根据实际要求选择合适的湿热处理条件, 以免影响淀粉深加工产品的质量。

2.7 浸泡吸水动力学参数及浸泡方程

浸泡方程可以用来描述浸泡过程中红薯淀粉的水分含量与温度和时间关系, 通过此方程可求出相应温度和时间下红薯淀粉的近似含水量^[17]。有研究表明, 湿热处理后红薯淀粉的吸水动力学参数与浸泡温度具有一定的线性相关^[29]。不同初始水分含量下经湿热处理所制得红薯淀粉的吸水动力学参数 K_1 和 K_2 见表 1, 其中 K_1 和 K_2 分别表示吸水动力学方程直线的斜率和截距。从数值变化情况来看, 尽管吸水动力学参数 K_1 和 K_2 与红薯淀粉的初始水分含量不存在明显线性相关性, 但初始水分含量从 20%~40% 所制红薯淀粉的吸水动力学参数 K_1 均低于 HMT-0, 而吸水动力学参数 K_2 数值变化很小。把 K_1 和 K_2 分别代入 Peleg 方程, 可得具体方程(见表 1 末列), 用此方程可计算和准确预测不同浸泡时间下红薯淀粉的含水量^[14]。

表 1 湿热处理红薯淀粉的 K_1 、 K_2 和浸泡方程式
Table 1 K_1 , K_2 and soaking equation of sweet potato starch soaked by heat-moisture treatment

红薯淀粉	动力学参数 K_1	动力学参数 K_2	线性相关系数 R	水分含量与时间的关系方程
HMT-0	0.2167	0.0195	0.9997	$M_t=5.07+t/(0.2167+0.0195t)$
HMT-20	0.1361	0.0191	0.9997	$M_t=1.51+t/(0.1361+0.0191t)$
HMT-25	0.1290	0.0192	0.9996	$M_t=1.93+t/(0.129+0.0192t)$
HMT-30	0.1326	0.0194	0.9996	$M_t=2.73+t/(0.1326+0.0194t)$
HMT-35	0.1380	0.0195	0.9996	$M_t=3.38+t/(0.138+0.0195t)$
HMT-40	0.1303	0.0197	0.9995	$M_t=4.24+t/(0.1303+0.0197t)$

注: 动力学参数 K_1 和 K_2 均为平均值。

2.8 湿热处理对红薯淀粉颗粒结晶结构的影响

图 7 为湿热处理前后红薯淀粉的 X-射线衍射图谱。淀粉颗粒的结晶区和无定形区中长时间序列(分子链堆砌次序)常通过 X-射线衍射法测定。红薯淀粉的特征衍射峰出现在 2θ 为 15.027°、17.094°、22.899° 处, 仍是 C 型结晶衍射特征^[30]。湿热处理后并没有改变红薯淀粉的晶体类型, 依然是 C 型结构。但经湿热处理后, 红薯淀粉的结晶度随着含水量的增加而减小, HMT-0、HMT-20、HMT-25、HMT-30、HMT-35、HMT-40 的结晶度分别为 56.09%、54.13%、

54.58%、42.59%、40.43%、30.82%, 表明湿热处理促使了淀粉链和螺旋结构的移动, 这导致了无定形区和结晶区结构的改变。衍射峰强度逐渐降低, 表明晶体有序化的程度有所减小, 但仍不足以改变红薯淀粉的晶体类型。

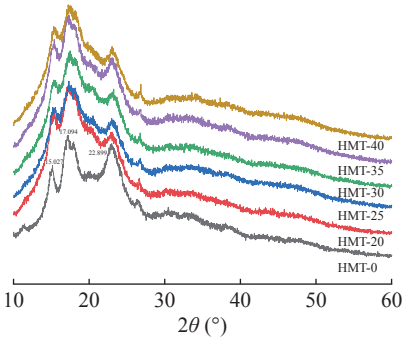


图 7 湿热处理对不同初始水分含量红薯淀粉结晶结构的影响
Fig.7 Effect of heat-moisture treatment on the crystal structure of sweet potato starch with different initial moisture content

3 结论

本研究探讨了湿热处理对红薯淀粉理化和结构等特性的影响。结果表明, 湿热处理后红薯淀粉溶解度、膨润力、凝沉性与透光率均降低, 持水力均增强, 且五种红薯淀粉均呈现相同趋势, 说明红薯品种与湿热处理对淀粉性质的影响规律无显著相关性; 湿热处理后并没有改变红薯淀粉的晶体类型, 依然是 C 型结构, 但经湿热处理后, 红薯淀粉的结晶度随着含水量的增加而减小, 表明湿热处理是红薯淀粉改性的有效方法。湿热处理淀粉吸水达到平衡所需要时间较原淀粉短, 且饱和吸水量较原淀粉有减小的趋势, 利用 Peleg 模型方程模拟湿热处理后红薯淀粉的吸水规律, 并计算出浸泡动力学吸水常数 K_1 和 K_2 , 确定了淀粉的吸水动力学方程, 可实现湿热处理后红薯淀粉在浸泡过程中的水分含量的预测。

参考文献

[1] QIN Z, LI A X, DONG S X, et al. Comparative transcriptome analysis of hybrid population provides insights into starch content in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) storage root[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2021, 39: 673–684.
[2] 马晨, 孙健, 张勇跃, 等. 甘薯淀粉的结构特性、物化特性及其加工应用[J]. *江西农业学报*, 2021, 33(12): 54–62. [MA C, SUN J, ZHANG Y, et al. Structural and physicochemical properties and processing applications of sweet potato starch[J]. *Acta Agriculture of Jiangxi*, 2021, 33(12): 54–62.]
[3] SUDLAPA P, ENVELOPE P S P. Dual complexation using heat moisture treatment and pre-gelatinization to enhance starch–phenolic complex and control digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108280.
[4] MATHOBO V M, SILUNGWE H, RAMASHIA S E, et al. Effects of heat-moisture treatment on the thermal, functional properties and composition of cereal, legume and tuber starches—a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 2.
[5] 王宏伟, 丁江涛, 张艳艳, 等. 湿热处理对薏米淀粉聚集态结构及糊化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 111–117.

- [WANG H W, DING J T, ZHANG Y Y, et al. Impact of heat moisture treatment on the aggregation structure and pasting behavior of adlay starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 111–117.]
- [6] ZHAO K, ZHANG B, SU C Y, et al. Repeated heat-moisture treatment: A more effective way for structural and physicochemical modification of mung bean starch compared with continuous way[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13: 452–461.
- [7] MAIOR L O, ALMEIDA V S, BARRETTI B R, et al. Combination of organic acid and heat-moisture treatment: Impact on the thermal, structural, pasting properties and digestibility of maize starch[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 143: 265–273.
- [8] 唐玮泽, 肖华西, 唐倩, 等. 多次湿热处理对大米淀粉结构和性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 77–83. [TANG W Z, XIAO H X, TANG Q, et al. Effect of multiple heat-moisture treatment on structure and properties of rice starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(10): 77–83.]
- [9] MATHOBO V M, SILUNGWE H, RAMASHIA S E, et al. Effects of heat-moisture treatment on the thermal, functional properties and composition of cereal, legume and tuber starches—a review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 412–426.
- [10] BRAHMA B, SIT N. Physicochemical properties and digestibility of heat moisture-treated potato starches for different treatment conditions[J]. *Potato Research*, 2020, 63: 367–383.
- [11] SIWATCH M, YADAV R B, YADAV B S. Annealing and heat-moisture treatment of amaranth starch: Effect on structural, pasting, and rheological properties[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16: 2323–2334.
- [12] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(10): 114–119, 130. [LIAO L Y, WU W G. Optimized technology for improving sweet potato starch noodle by heat-moisture treatment[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(10): 114–119, 130.]
- [13] De OLIVEIRA C S, BET C D, BISINELLA R Z B, et al. Heat-moisture treatment (HMT) on blends from potato starch (PS) and sweet potato starch (SPS)[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 133, 1491–1498.
- [14] 杨积鹏, 魏华, 刘建福. 豌豆浸泡过程中的吸水动力学研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 105–110. [YANG J P, WEI H, LIU J F. Study on water absorption kinetics of peas during soaking[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 105–110.]
- [15] 周罗娜, 邓仁菊, 王梅, 等. 自然发酵对甘薯淀粉及粉条特性的影响[J]. *食品科技*, 2021, 46(8): 141–146. [ZHOU L N, DENG R J, WANG M, et al. Effects of natural fermentation on characteristics of sweet potato starch and vermicelli[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(8): 141–146.]
- [16] WATTANANAPAKASEM I, PENJUMRAS P, MALAIT-HONG W, et al. Effect of heat-moisture treatment of germinated black rice on the physicochemical properties and its utilization by lactic acid bacteria[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 4636–4645.
- [17] 刘子桢, 余世锋. 马铃薯淀粉、红薯淀粉、木薯淀粉吸水特性的研究[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(3): 12–16. [LIU Z Z, YU S F. Study on water absorption characteristics of potato starch, sweet potato starch and cassava starch[J]. *Grain and Oil*, 2021, 34(3): 12–16.]
- [18] 乔昂, 王志伟, 周中凯. 湿热处理对糜子粉及淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(11): 42–48. [QIAO A, WANG Z W, ZHOU Z K. Effects of heat moisture treatment on physicochemical properties of proso millet flour and starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(11): 42–48.]
- [19] 刘庆庆, 庄茂君, 杨芳, 等. 湿热处理对天麻淀粉理化性质的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(12): 199–204. [LIU Q Q, ZHUANG M J, YANG F F, et al. Effects of heat-moisture treatment on physicochemical properties of *Gastrodia* starch[J]. *China Food Additives*, 2022, 33(12): 199–204.]
- [20] SANTOS C S D, MEDEIROS A M C, ALMEIDA E L, et al. Effects of low heat-moisture treatment in prata green banana starch (Musa AAB-Prata)[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12: 1938–1944.
- [21] 曹旭, 辛明航, 刘婷婷, 等. 湿热处理对油莎豆淀粉理化性质、结构及体外消化特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(10): 131–137. [CAO X, XIN M H, LIU T T, et al. Impact of heat moisture treatment on physicochemical properties, structure and digestive properties of *Cyperus esculentus* L. starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(10): 131–137.]
- [22] CHAKRABORTY I, GOVINDARAJU I, RONGPIPI S, et al. Effects of hydrothermal treatments on physicochemical properties and *in vitro* digestion of starch[J]. *Food Biophysics*, 2021, 16: 544–554.
- [23] 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. [JIA S Y, ZHANG B R, LI J, 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.]
- [24] 王晓培, 陈正行, 李娟, 等. 湿热处理对大米淀粉理化性质及其米线品质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 182–187, 210. [WANG X P, CHEN Z X, LI J, et al. Effect of heat-moisture treatment on various physicochemical properties of rice starch and quality of rice starch noodles[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(5): 182–187, 210.]
- [25] 刘程玲, 胡煜莹, 王力翔, 等. 普鲁兰酶酶解处理红薯淀粉及其性质研究[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(2): 6–11. [LIU C L, HU Y Y, WANG L H, et al. Pullulanase enzymatic treatment on sweet potato starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(2): 6–11.]
- [26] SINDHU R, DEVI A, KHATKAR B S. Physicochemical, thermal and structural properties of heat moisture treated common buckwheat starches[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56: 2480–2489.
- [27] 张玲, 韩基明, 丁卫英, 等. 不同品种糯玉米淀粉特性的比较研究[J]. *中国调味品*, 2021, 46(12): 6–13. [ZHANG L, HAN J M, DING W Y, et al. Comparative study on the properties of different kinds of waxy corn starches[J]. *China Condiment*, 2021, 46(12): 6–13.]
- [28] 翟爱华, 韦智, 王雪纯, 等. 蔗糖对不同品种赤小豆淀粉性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 83–89. [ZHAI A H, WEI Z, WANG X C, et al. Effect of sucrose on properties of different red adzuki bean starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(2): 83–89.]
- [29] 陈楚瑶, 李丹丹, 陶阳, 等. 微波预处理对红豆吸水特性、外观及淀粉特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 56–64. [CHEN C Y, LI D D, TAO Y, et al. Effect of microwave pretreatment on water absorption characteristics, appearance and starch properties of adzuki bean[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 56–64.]
- [30] 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.