



王艳,张煜松,刘兴丽,等. 湿热处理对绿豆淀粉结构及理化特性的影响[J]. 轻工学报,2022,37(3):36-42.
WANG Y,ZHANG Y S,LIU X L,et al. Effect of heat moisture treatment on the structural and physicochemical properties of mung bean starch[J]. Journal of Light Industry,2022,37(3):36-42.
DOI:10.12187/2022.03.005

湿热处理对绿豆淀粉结构及理化特性的影响

王艳¹,张煜松¹,刘兴丽^{1,2},张艳艳^{1,2},张华^{1,2},王宏伟^{1,2}

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院,河南 郑州 450001;
2. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室,河南 郑州 450001

摘要: 采用湿热处理对绿豆淀粉进行改性,研究湿热处理过程中不同水分含量(15%、20%、25%和30%)对绿豆淀粉结构(结晶结构和短程有序化结构)和理化特性(热力学特性、糊化特性和消化特性)的影响。结果表明:湿热处理未改变绿豆淀粉的结晶类型,但其相对结晶度和短程有序化程度降低;随着湿热处理过程中体系水分含量的增加,绿豆淀粉的糊化温度、峰值温度和终止温度均增加,而峰值黏度、终值黏度和回生值均降低,即绿豆淀粉的热稳定性增强;与湿热处理前的绿豆淀粉相比,湿热处理能明显增加绿豆淀粉中的抗性淀粉含量。

关键词: 绿豆淀粉;湿热处理;结构特性;糊化特性;消化特性

中图分类号: TS235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2022)03-0036-07

0 引言

绿豆(*Vigna radiata* L.)作为重要的食用豆类 and 传统功能性食品^[1],富含碳水化合物、蛋白质、脂肪、维生素、矿物质、黄酮、酚类等营养成分,具有抗肿瘤、降血脂、清热解毒等功效^[2-3],以绿豆淀粉为原料制作的食品深受人们的喜爱。绿豆中淀粉含量较高,约占全种子质量的54.73%~57.99%,其中较高的直链淀粉含量(30%~45%)使绿豆淀粉具有较好的胶凝能力和黏结性,因此绿豆成为淀粉提取的重要来源^[4-5]。作为一种新型膳食纤维,抗性淀粉(Resistant Starch,RS)特殊的分子结构会限制其与酶的结合能力,导致其在肠道中不易被淀粉酶消化、吸收,从而较好地调控餐后血糖反应^[4],可用于开

发低热量的功能性食品。目前,RS已引起业界的广泛关注,并成为营养学领域的研究热点。绿豆较高的直链淀粉含量使其成为制备RS的重要原料,如何提高绿豆的RS产量及加工适用性成为亟待解决的问题。

湿热处理(Heat-moisture Treatment,HMT)技术具有工艺简单、节能环保、快速安全等优点,是一种易被消费者接受的绿色环保物理改性技术。淀粉的湿热处理是指将淀粉在较低水分含量(10%~30%)、较高温度(90~130℃)条件下处理一定时间(15min~6h),即通过水分子和热的共同作用改变淀粉的结构和理化特性进而影响其应用特性^[6]。湿热处理能有效增加RS含量,是制备RS较常见的方法^[7]。目前,关于湿热处理增加RS含量的研究

收稿日期:2021-08-04;修回日期:2022-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(32101976);河南省科技攻关项目(212102110328)

作者简介:王艳(1993—),女,河南省周口市人,郑州轻工业大学硕士研究生,主要研究方向为速冻食品加工。E-mail:15896767600@163.com

通信作者:王宏伟(1988—),男,河南省周口市人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为速冻米面食品加工。E-mail:2017107@zzuli.edu.cn

主要集中于玉米、大米、小麦、甘薯、马铃薯等谷物及薯类淀粉材料方面^[8-10],如 J. L. Chang 等^[10]研究了湿热处理对马铃薯淀粉消化性能的影响,发现湿热处理能有效增加 RS 含量。而通过湿热处理增加绿豆中 RS 含量的研究仍较少。基于此,本文拟采用湿热处理对绿豆淀粉进行改性,研究湿热处理对绿豆淀粉结构及理化特性的影响,以期研发绿豆 RS 增值产品提供思路,也为湿热处理制备绿豆 RS 的研究和应用提供参考和借鉴。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

绿豆(豫绿2号),河南亿昌生物技术有限公司产;KBr、醋酸钠、猪胰 α -淀粉酶(8×USP/g)、淀粉糖苷酶(316 U/mL),美国 Sigma 公司产;葡萄糖试剂盒,爱尔兰 Megazyme 公司产。以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

TG16-WS 型台式高速离心机,湖南湘仪实验室仪器开发公司产;DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海一恒科技有限公司产;250 mL 高压反应釜,上海秋佐科学仪器有限公司产;D8 advance 型 X 射线衍射仪、Vertex 70 型傅里叶变换红外光谱仪,德国 Bruker 公司产;BWS 465-785 S 型高性能便携式激光拉曼光谱仪,美国 Microtrac 有限公司产;RVA 4500 型快速黏度测定仪,澳大利亚波通仪器有限公司产;Discovery 型流变仪、DSC Q20 型差示扫描量热仪,美国 TA 公司产;TU-1810PC 型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司产;Atlas™25 T 型手动液压机,英国 Specac 公司产。

1.3 实验方法

1.3.1 绿豆淀粉的制备 将绿豆洗净后,与去离子水按照 $m(\text{绿豆/g}) : V(\text{去离子水/mL}) = 1 : 5$ 混合浸泡 12 h;磨浆过 100 目筛,去除杂质和皮渣,将滤液于 3500 r/min 条件下离心 10 min;于下层沉淀中加入 5 倍体积的去离子水,搅拌后离心,去除上清液,对下层沉淀进行洗涤,重复上述步骤 3 次。将洗涤后的下层沉淀于 40 °C 烘箱中干燥 24 h,粉碎过 100 目筛,即得绿豆淀粉。

1.3.2 绿豆淀粉的湿热处理 准确称量 20 g 绿豆淀粉(干基),添加适量去离子水,使淀粉体系中水分含量分别为 15%、20%、25% 和 30%,并于 4 °C 条件下平衡 24 h。将平衡后的样品转移至 200 mL 高压反应釜中,于 110 °C 干燥箱中湿热处理 4 h,将反应结束的高压反应釜取出静置冷却。冷却后将样品取出,于 45 °C 烘箱中干燥 24 h 后,研磨过筛。将湿热处理后的绿豆淀粉样品分别命名为 HMT-15、HMT-20、HMT-25 和 HMT-30,其中 15、20、25、30 分别代表湿热处理过程中相应淀粉体系的水分含量,将湿热处理前的绿豆淀粉样品作为对照组。

1.3.3 结晶结构测定 将湿热处理前后的绿豆淀粉样品于室温下平衡 24 h 后,将其均匀平铺在样品池中,采用 X 射线衍射仪测定其结晶结构。参数设置为:工作电压 40 kV,管流 30 mA,扫描范围 $2\theta = 4^\circ \sim 40^\circ$,步长 0.033° 。根据王宏伟^[11]的方法计算绿豆淀粉样品的相对结晶度(RC)。

1.3.4 傅里叶红外光谱测定 称量约 2 mg 绿豆淀粉样品(干基),按照 $m(\text{绿豆淀粉样品}) : m(\text{KBr}) = 1 : 100$ 添加 KBr 粉末,于石英研钵中混合研磨均匀,采用手动液压机压制厚度约 0.5 mm 的薄片。以 4 cm^{-1} 的分辨率对每个样品扫描 64 次,记录绿豆淀粉样品在 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的红外光谱图,并对所得光谱图进行去卷积和分峰处理。

1.3.5 拉曼光谱测定 利用配备 785 nm 激发光源的高性能便携式激光拉曼光谱仪记录湿热处理前后绿豆淀粉样品的拉曼光谱。参数设置为:测试范围 $3200 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$,累计扫描 6 次,分辨率 4 cm^{-1} ,以空气为背景。记录 480 cm^{-1} 处波段的半峰宽(FWHM)。

1.3.6 热力学特性测定 采用差示扫描量热仪测定湿热处理前后绿豆淀粉样品的热稳定性。按照 $m(\text{绿豆淀粉样品}) : m(\text{去离子水}) = 1 : 2$ 配制绿豆淀粉乳液,于 4 °C 条件下平衡 24 h 后,准确称取 10 mg 绿豆淀粉乳液于测试铝盒中,以 $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率记录绿豆淀粉样品从 20 °C 升温至 120 °C 的热流曲线,并以密封的空铝盒为参照。

1.3.7 糊化特性测定 按照 GB/T 24852—2010^[12]的方法测定湿热处理前后绿豆淀粉样品的糊化特性。将绿豆淀粉样品配制成质量分数为 6%(干基)的淀

粉乳液,准确移取 25 g 淀粉乳液于铝罐中,采用快速黏度测定仪进行分析测定。程序设置为:以 960 r/min 的转速于 35 °C 条件下保温 1 min,降速至 160 r/min 并保持恒定,以 5 °C/min 升温至 95 °C 并保温 10 min,随后以 5 °C/min 降温至 50 °C 并保温 10 min。

1.3.8 消化特性测定 参照 H. N. Englyst 等^[13]的方法测定湿热处理前后绿豆淀粉的体外消化率,并稍加改动。具体方法为:将 1 g 绿豆淀粉样品和 15 mL 醋酸钠缓冲液(0.1 mol/L, pH 值为 5.2)于 50 mL 锥形瓶中混合均匀,分别加入 5 颗玻璃珠后,放入 100 °C 水浴锅中煮制 30 min,制得煮熟的绿豆淀粉糊,取出后冷却至 37 °C;将绿豆淀粉糊放入 37 °C、190 r/min 的振荡水浴锅中,加入 5 mL 淀粉酶混合液进行水解;分别在水解 20 min 和 120 min 时取 0.5 mL 水解液,于 100 倍体积乙醇溶液(体积分数为 70%)中灭酶活;将灭酶活的样品于 4000 r/min 条件下离心 10 min,取 0.1 mL 离心后的上清液,利用葡萄糖试剂盒测定水解过程中的葡萄糖含量,根据不同时间酶解葡萄糖含量计算样品的快消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)和 RS 含量。

1.4 数据处理

上述所有实验均重复 3 次,数据采用(平均值±标准差)表示。采用 SPSS16.0 和 Origin 2018 分析处理软件进行数据分析并作图。

2 结果与分析

2.1 湿热处理对绿豆淀粉结晶结构的影响分析

淀粉的结晶结构是由淀粉双螺旋结构的排列、堆积和取向构成的^[14]。图 1 为湿热处理前后绿豆淀粉的 X 射线衍射曲线。由图 1 可知,绿豆淀粉样品分别在 2θ 为 15°、17°、18°和 23°处显示特征衍射峰,其中在 15°和 23°处表现为单峰衍射峰,而在 17°和 18°处表现为双峰衍射峰,这表明绿豆淀粉为典型的 A 型结晶类型,这与王立东等^[15]的研究结果一致。湿热处理后,绿豆淀粉的特征衍射峰无明显变化,这表明湿热处理未改变绿豆淀粉的结晶类型。根据淀粉结晶区和无定形区在 X 射线衍射曲线中

不同特征衍射峰的表现形式可计算淀粉的 RC ^[16]。湿热处理前后绿豆淀粉的 RC 如表 1 所示。由表 1 可知,湿热处理前绿豆淀粉的 RC 为 31.6%,湿热处理后绿豆淀粉的 RC 明显降低($P < 0.05$),且 RC 随着体系水分含量的增加进一步降低。这可能是由于在水分子和热的共同作用下,淀粉分子内或分子间的氢键断裂,由氢键构成的双螺旋结构发生一定程度的解旋,阻碍了双螺旋结构间的定向取向和紧密排列,导致绿豆淀粉的 RC 明显降低。

2.2 湿热处理对绿豆淀粉短程有序化结构的影响分析

在傅里叶红外光谱图中,由于 1045 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处的特征衍射峰分别与淀粉微观结构中的结晶结构和无定形结构有关,因此可通过计算 1045 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 处峰强度的比值($R_{1045/1022}$)研究湿热处理过程中绿豆淀粉聚集结构表面的短程有序化程度^[17]。 $R_{1045/1022}$ 与淀粉短程有序化程度成正比,即 $R_{1045/1022}$ 越小,淀粉的短程有序化程度越低。图 2 为湿热处理前后绿豆淀粉的傅里叶去卷积

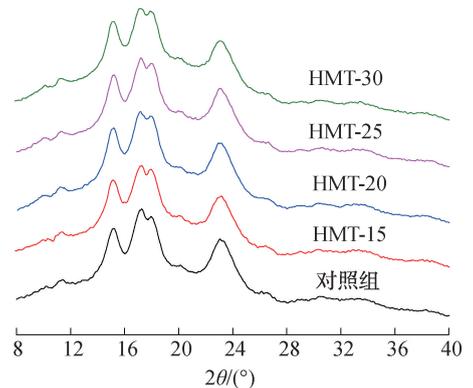


图 1 湿热处理前后绿豆淀粉的 X 射线衍射曲线
Fig. 1 X-ray diffraction patterns of native and HMT treated mung bean starch

表 1 湿热处理前后绿豆淀粉的 RC 和短程有序化结构

Table 1 RC and short-range ordered molecular structure of native and HMT-treated mung bean starch

样品	$RC/\%$	$R_{1045/1022}$	$FWHM$
对照组	31.6±1.2 ^a	1.52±0.12 ^a	21.2±1.1 ^d
HMT-15	29.4±0.5 ^b	1.44±0.05 ^{ab}	23.3±0.6 ^c
HMT-20	27.6±1.2 ^c	1.36±0.12 ^b	23.6±0.5 ^c
HMT-25	26.7±1.1 ^c	1.27±0.11 ^c	24.4±0.6 ^b
HMT-30	25.5±0.7 ^d	1.15±0.07 ^d	25.7±0.7 ^a

注:同一列不同肩标字母表示有显著性差异($P < 0.05$),下同。

图谱,根据该图计算的 $R_{1045/1022}$ 见表 1。由表 1 可知,湿热处理显著降低了绿豆淀粉的 $R_{1045/1022}$ ($P < 0.05$),且随着绿豆淀粉水分含量的增加, $R_{1045/1022}$ 下降趋势更显著,由未处理前的 1.52 降至 1.15。这表明湿热处理导致绿豆淀粉颗粒的短程有序化程度降低,结构趋于无序,且水分含量越高,湿热处理对绿豆淀粉的短程有序化程度破坏越大。这是由于湿热处理导致绿豆淀粉的螺旋结构比重降低,且随着反应过程中淀粉体系水分含量的增加,更多的水分子给予了淀粉链或其链段更大的自由体积,使淀粉分子链之间原有的氢键被破坏得更彻底,进而使淀粉分子的短程有序化程度降低。

拉曼光谱可以用来分析淀粉分子基团和化学键的伸缩振动^[18]。图 3 为湿热处理前后绿豆淀粉的拉曼光谱曲线。由图 3 可知,湿热处理前后绿豆淀粉的特征基团振动峰的位置无明显变化,表明湿热处理未改变绿豆淀粉的分子结构和化学组成。有研究^[19]表明,淀粉的拉曼光谱位移在 480 cm^{-1} 处特征峰的 $FWHM$ 与其短程有序结构相关,即 $FWHM$ 越大,短程有序化程度越低。由表 1 可知,湿热处理后淀粉的 $FWHM$ 增加,且随着处理体系中水分含量的增加, $FWHM$ 呈上升趋势,表明绿豆淀粉分子的短程有序化程度降低,这与红外光谱的分析结果一致。

2.3 湿热处理对绿豆淀粉热力学特性的影响分析

表 2 为湿热处理前后绿豆淀粉的热力学参数。由表 2 可知,与湿热处理前的绿豆淀粉相比,湿热处

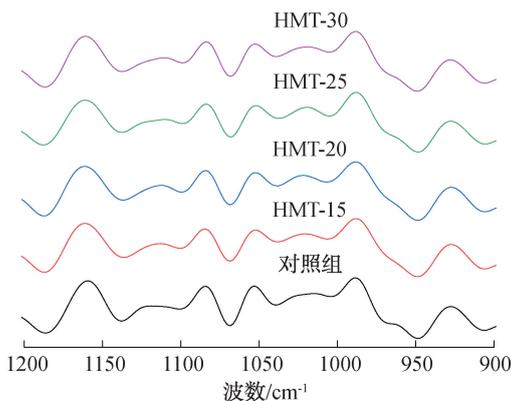


图 2 湿热处理前后绿豆淀粉的傅里叶去卷积图谱
Fig. 2 Deconvoluted FTIR spectra of native and HMT-treated mung bean starch

理明显提高了绿豆淀粉糊化过程中的热转变温度,即起糊温度 (T_o)、峰值温度 (T_p) 和终止温度 (T_c) 均升高 ($P < 0.05$),且上述温度均随体系水分含量的增加而逐渐升高。热转变温度的升高是由于湿热处理在破坏淀粉结晶结构的同时,增强了分子间的相互作用,使淀粉分子重排形成热稳定性较高、结构更完善的有序结构(双螺旋和结晶结构)。随着绿豆淀粉处理体系水分含量的增加,这种现象更加明显,这主要是因为水分含量的增加有利于增强淀粉分子链在湿热处理过程中的活性,使分子间更易相互作用生成具有更高热稳定性的有序结构^[20]。有研究^[21]表明,糊化焓 (ΔH) 代表淀粉颗粒在糊化过程中破坏其内部结晶结构和无定形结构所需要的能量。湿热处理导致绿豆淀粉 ΔH 显著降低 ($P < 0.05$),表明湿热处理破坏了绿豆淀粉颗粒的有序结构,且破坏程度随湿热处理过程中体系水分含量的增加而增强。

2.4 湿热处理对绿豆淀粉糊化特性的影响分析

图 4 和表 3 分别为湿热处理前后绿豆淀粉的成糊曲线及对应的糊化特性参数。由图 4 和表 3 可知,湿热处理显著增加了绿豆淀粉的起始糊化温度

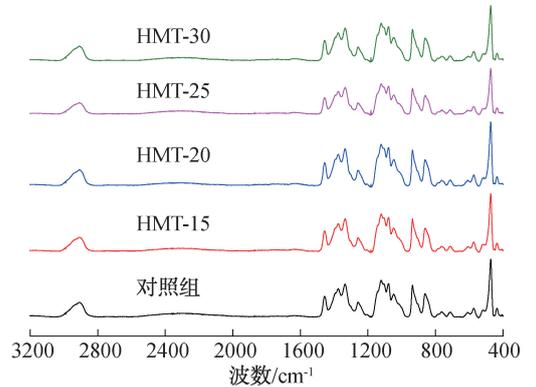


图 3 湿热处理前后绿豆淀粉的拉曼光谱曲线
Fig. 3 Raman spectra of native and HMT-treated mung bean starch

表 2 湿热处理前后绿豆淀粉的热力学参数
Table 2 Thermal behavior parameters of native and HMT-treated mung bean starch

样品	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
对照组	62.5 ± 0.4^a	68.2 ± 0.4^a	88.8 ± 0.7^d	14.1 ± 0.6^a
HMT-15	67.4 ± 0.2^d	72.8 ± 0.3^d	90.4 ± 0.8^c	12.5 ± 0.5^b
HMT-20	70.3 ± 0.4^e	79.7 ± 0.5^e	91.2 ± 0.4^c	11.3 ± 0.3^c
HMT-25	71.9 ± 0.5^b	81.3 ± 0.5^b	92.7 ± 0.6^b	9.8 ± 0.4^d
HMT-30	73.6 ± 0.2^a	82.4 ± 0.4^a	94.5 ± 0.6^a	8.7 ± 0.5^e

(*PT*),并导致峰值黏度(*PV*)、终值黏度(*FV*)、崩解值(*BD*)、回生值(*SB*)及整体糊化黏度降低。糊化温度的升高是由于在湿热处理过程中,水分子的存在促进了淀粉分子链的迁移,增强了淀粉分子间的相互作用,使热处理过程中破坏淀粉分子间相互作用所需的能量增加。且有研究^[22]表明,湿热处理会破坏淀粉结构中不完美的结晶结构,使原有的结晶结构更趋于完美,而破坏这些结晶结构需要的更多热量使淀粉成糊温度升高。上述现象随着湿热处理过程中体系水分含量的增加不断增强,这是由于湿热处理过程中水分含量越多,对淀粉颗粒内部分子链间的促进作用越强。淀粉糊黏度的降低说明改性淀粉的溶胀能力降低,这可能是由于湿热处理增强了淀粉分子的相互作用。而*SB*的降低则进一步说明了在加热过程中淀粉的热稳定性增强,导致直链淀粉浸出和重排减少。

2.5 湿热处理对绿豆淀粉消化特性的影响分析

表4为湿热处理前后绿豆淀粉的消化特性参

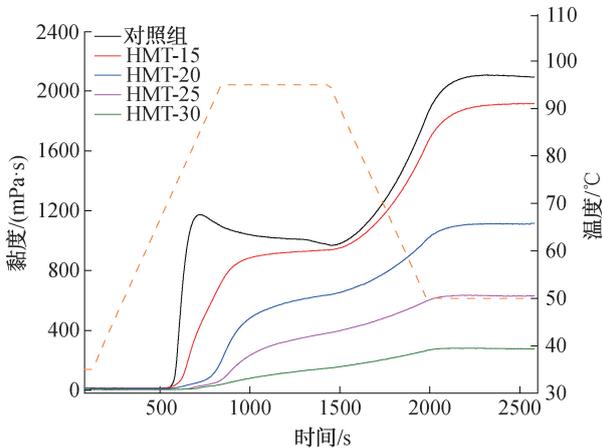


图4 湿热处理前后绿豆淀粉的成糊曲线

Fig. 4 Pasting curve of native and HMT-treated mung bean starch

表3 湿热处理前后绿豆淀粉的糊化特性参数

Table 3 Pasting property parameters of native and HMT-treated mung bean starch

样品	<i>PT</i> /°C	<i>PV</i> /(mPa·s)	<i>FV</i> /(mPa·s)	<i>BD</i> /(mPa·s)	<i>SB</i> /(mPa·s)
对照组	68.9±0.5 ^c	1 088.2±13.9 ^a	2 093.4±25.3 ^a	201.5±16.3 ^a	271.9±9.3 ^a
HMT-15	70.2±0.4 ^b	602.7±10.5 ^b	1 917.2±21.5 ^b	ND	254.1±8.6 ^b
HMT-20	72.2±0.5 ^b	393.5±6.8 ^c	1 115.8±18.2 ^c	ND	106.6±7.2 ^c
HMT-25	79.3±0.6 ^a	256.3±5.3 ^c	631.6±16.8 ^d	ND	34.7±6.2 ^c
HMT-30	79.7±0.4 ^a	100.1±4.5 ^d	276.4±12.7 ^e	ND	9.5±1.2 ^c

注:ND表示未检测出。

数。由表4可知,湿热处理前绿豆淀粉的RDS、SDS和RS含量分别为74.1%、10.3%和15.6%,而湿热处理后绿豆淀粉的RDS含量降低,SDS和RS含量分别增加,且这种趋势随着处理体系中水分含量的增加而不断增强。该结果表明湿热处理降低了淀粉的消化速率。这是由于湿热处理促进了淀粉分子内和分子间氢键的断裂,进而导致晶体结构非晶化(相对结晶度降低)和短程有序化结构降低。但分散的淀粉分子链又会重新排列,增强淀粉分子的热稳定性,降低淀粉分子对酶的敏感性,导致淀粉的消化速率减慢。而随着样品体系中水分含量的增加,更多的水分子给予了淀粉链或其链段更大的自由体积,促进了淀粉分子相互结合形成氢键,促使新的有序化结构形成,进而阻碍了酶的结合位点。

3 结论

本文研究了湿热处理过程中不同水分含量绿豆淀粉的结晶结构、短程有序化结构、热力学特性、糊化特性及消化特性。结果表明,湿热处理不改变绿豆淀粉的结晶类型,但水分子和热的共同作用改变了绿豆淀粉的聚集结构,导致其相对结晶度和短程有序化程度降低;聚集结构的转变增强了绿豆淀粉的糊化稳定性,提高了体系的热转变温度,降低了绿豆淀粉糊的黏度,即湿热处理在降解淀粉分子链的

表4 湿热处理前后绿豆淀粉的消化特性参数

Table 4 Digestion property parameters of native and HMT-treated mung bean starch %

样品	RDS含量	SDS含量	RS含量
对照组	74.1±1.5 ^a	10.3±0.7 ^d	15.6±1.0 ^e
HMT-15	70.3±1.2 ^b	12.6±0.5 ^c	17.1±1.1 ^d
HMT-20	63.4±1.3 ^c	14.8±1.1 ^b	21.8±1.3 ^c
HMT-25	58.6±0.8 ^d	15.1±0.9 ^b	26.3±1.2 ^b
HMT-30	51.1±1.1 ^e	17.2±1.3 ^a	31.7±1.4 ^a

同时也会使淀粉链的自由运动增强,促进淀粉链的重排和取向;上述结果也导致了湿热处理后绿豆淀粉的RS含量显著增加。本研究可为湿热处理制备RS的研究提供理论依据,并为绿豆增值产品的开发提供参考。

参考文献:

- [1] 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 (3): 452-461.
- [2] QIAN L L, LI D W, SONG X J, et al. Identification of Baha'sib mung beans based on Fourier transform near infrared spectroscopy and partial least squares [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 105: 104203.
- [3] DU M X, XIE J H, GONG B, et al. Extraction, physicochemical characteristics and functional properties of Mung bean protein [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 76: 131-140.
- [4] SHEN H S, GUO Y, ZHAO J Y, et al. The multi-scale structure and physicochemical properties of mung bean starch modified by ultrasound combined with plasma treatment [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 191: 821-831.
- [5] ROMPOTHI O, PRADIPASENA P, TANANUWONG K, et al. Development of non-water soluble, ductile mung bean starch based edible film with oxygen barrier and heat sealability [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 748-756.
- [6] ZHANG Y, ZHAO X T, BAO X Y, et al. Effects of pectin and heat-moisture treatment on structural characteristics and physicochemical properties of corn starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106664.
- [7] FONSECA L M, EL HALAL S L M, DIAS A R G, et al. Physical modification of starch by heat-moisture treatment and annealing and their applications: A review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 274: 118665.
- [8] ZHANG B, ZHAO K, SU C Y, et al. Comparing the multi-scale structure, physicochemical properties and digestibility of wheat A- and B-starch with repeated versus continuous heat-moisture treatment [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 519-528.
- [9] 王宁, 阮长青, 张东杰, 等. RS3型抗性淀粉制备方法研究进展 [J]. *中国粮油学报*, 2021, 36 (12): 185-193.
- [10] CHANG J L, TAE W M. Structural characteristics of slowly digestible starch and resistant starch isolated from heat-moisture treated waxy potato starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125: 200-205.
- [11] 王宏伟. 湿热处理和脂肪酸复合作用调控大米淀粉消化性能及营养功能的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [12] 中华人民共和国国家粮食局科学研究院. 大米及米粉糊化特性测定 快速粘(黏)度仪法: GB/T 24852—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] ENGLYST H N, CUMMINGS J H. Digestion of the polysaccharides of some cereal foods in the human small intestine [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1985, 42(5): 778-787.
- [14] ZHENG B, GUO X B, TANG Y K, et al. Development changes in multi-scale structure and functional properties of waxy corn starch at different stages of kernel growth [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 191: 335-343.
- [15] 王立东, 刘婷婷, 寇芳, 等. 球磨研磨对绿豆淀粉颗粒结构及性质的影响 [J]. *中国食品添加剂*, 2016(7): 167-173.

- [16] PINKAEW H, WANG Y J, NAIVIKUL O. Impact of pre-germination on amylopectin molecular structures, crystallinity, and thermal properties of pre-germinated brown rice starches [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 73: 151–157.
- [17] WANG H W, ZHANG B J, CHEN L, et al. Understanding the structure and digestibility of heat-moisture treated starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 88: 1–8.
- [18] MUTUNGI C, PASSAUER L, ONYANGO C, et al. Debranched cassava starch crystallinity determination by Raman spectroscopy: Correlation of features in Raman spectra with X-ray diffraction and C-13 CP/MAS NMR spectroscopy [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(1): 598–606.
- [19] WANG H W, LIU Y F, CHEN L, et al. Insights into the multi-scale structure and digestibility of heat-moisture treated rice starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 242: 323–329.
- [20] WANG H W, DING J T, XIAO N Y, et al. Insights into the hierarchical structure and digestibility of starch in heat-moisture treated adlay seeds [J]. *Food Chemistry*, 2020, 318: 126489.
- [21] TAO H, WANG P, ALI B, et al. Structural and functional properties of wheat starch affected by multiple freezing/thawing cycles [J]. *Starch-Starke*, 2015, 67(7/8): 683–691.
- [22] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热改性淀粉研究进展 [J]. *食品与机械*, 2015, 31(5): 266–269.

Effect of heat moisture treatment on the structural and physicochemical properties of mung bean starch

WANG Yan¹, ZHANG Yusong¹, LIU Xingli^{1,2}, ZHANG Yanyan^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}

1. *College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;*

2. *He'nan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China*

Abstract: Mung bean starch was modified by heat moisture treatment (HMT). The effects of HMT on the structural properties (crystalline and short-range ordered molecular structure) and physicochemical properties (thermodynamics, pasting and digestion properties) of samples with different moisture contents (15%, 20%, 25% and 30%) were studied. The results showed that the crystal type of mung bean starch was not changed by HMT, but the crystallinity and short-range ordered molecular structures decreased. With the increase of moisture content, the gelatinization, peak and termination temperature of mung bean starch increased, while the peak viscosity, final viscosity and setback decreased. These results showed that the thermal stability of starch was enhanced after HMT. Compared with the original mung bean starch, the content of resistant starch was significantly increased by HMT.

Key words: mung bean starch; heat moisture treatment; structural property; pasting property; digestion property

(责任编辑:杨晓娟)