

超声波协同发芽处理对糙米淀粉结构和理化性质的影响

张广琛, 孙雪, 许新月, 华东, 刘贺*
(渤海大学食品科学与工程学院 辽宁锦州 121013)

摘要 为了探究超声波协同发芽处理对糙米淀粉结构和理化性质的影响,采用波谱分析和电镜检测等方法,对比糙米、超声糙米、发芽糙米和超声协同发芽糙米中 α -淀粉酶活性、淀粉表观与晶体结构以及理化性质的变化。结果显示:与糙米淀粉相比,超声波协同发芽处理提高了发芽糙米中 α -淀粉酶活性和还原糖含量,分别增加了0.9倍和12.0倍,淀粉含量降低了16.2%。超声波协同发芽处理使糙米淀粉颗粒表面呈现较多的凹坑和孔隙,但仍保持着原有的形貌特征。协同处理后糙米淀粉的晶体类型未发生显著变化,但其相对结晶度显著降低($P<0.05$)。超声波协同发芽对糙米淀粉的糊化黏度影响显著,糊化焓值增加了0.6倍,崩解值减少了22.4%。结论:超声波协同发芽处理提升了糙米中 α -淀粉酶活性,进而影响了糙米淀粉的结构特征与理化性质,这为糙米淀粉产品的改良和发芽全谷物食品的开发提供了理论依据。

关键词 超声波协同发芽处理; 糙米淀粉; α -淀粉酶活性; 结构特性; 理化性质

文章编号 1009-7848(2024)09-0268-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.09.025

随着消费者健康意识的提高,近年来对谷物淀粉的需求量逐渐增加。糙米等全谷物的推广,不仅有助于国民膳食营养水平的提高,而且能够通过提升谷物可食用率以缓解粮食需求压力^[1]。全谷物淀粉的结构特性、理化性质以及食用品质研究已成为食品研究领域的热点之一。目前,改善谷物淀粉品质的物理方法主要包括静磁场^[2]、等离子体技术^[3]、高压均质处理^[4]和超声波(UT)处理^[5]等。超声波作为一种物理刺激技术,因安全易控、绿色高效等特点而被广泛应用于发芽谷物的预处理以及淀粉改性等领域。超声波处理后淀粉结构的变化会引起其功能特性的改变,从而扩大了淀粉的应用范围^[6]。近年来,超声波处理技术在全谷物食用品质改良以及淀粉改性等方面已有诸多报道。梁云浩等^[7]研究了超声处理时间对糙米淀粉结构和理化性质的影响,发现超声波会破坏糙米淀粉的微观结构和结晶特性,并且随着超声时间的延长淀粉表观结构被明显的破坏,然而适度的超声处理可以赋予淀粉类制品更好的质地属性。朱创等^[8]研究了超声波处理对发芽糙米营养物质和感官特

性的影响,发现超声波促进糙米中类黄酮等活性成分的积累,降低糙米皮层的硬度、黏度和弹性。Wang等^[9]探究了不同超声时间对甘薯淀粉结构特征及理化性质的影响规律,随着超声时间的延长淀粉表面的孔隙和裂纹数量逐渐增加,糊化温度和糊化黏度下降。Kaur等^[10]评估了超声处理对小麦等多种谷物淀粉营养和结构特性的影响,高强度的超声处理可提高谷物淀粉的溶胀能力和溶解度,然而对淀粉颗粒表观结构造成一定程度的破坏。

淀粉作为糙米中最主要的成分,为发芽提供能量和物质基础。糙米发芽过程中淀粉在不同酶的作用下会发生不同程度的变化^[11]。许多研究报道了糙米发芽过程中淀粉结构和理化性质的变化规律,然而关于超声波协同发芽处理对糙米淀粉结构影响的研究较少。此前研究发现超声波协调发芽处理可以促进糙米中淀粉等大分子物质的降解,同时提高发芽效率^[12]。基于此,本研究采用超声波协同发芽处理方式对发芽糙米中淀粉结构和理化特性展开研究,探究超声波处理、发芽处理和超声波协同发芽处理对糙米淀粉表观结构、晶体结构以及理化性质的影响,旨在为糙米淀粉产品加工特性改良提供理论依据,为全谷物食品开发提供新的思路。

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”科技创新领军人才(XLYC2002039);辽宁省博士启动项目(0702304);辽宁省教育厅青年项目(LJKQZ20222421)

第一作者: 张广琛,男,博士,讲师

通信作者: 刘贺 E-mail: liuhe2069@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试粳稻为越光(2021年10月收获于沈阳农业大学辽中种植基地),测试前密封保存在4℃条件下。

无水乙醇、氢氧化钠、溴化钾等,阿拉丁试剂有限公司;淀粉检测试剂盒、 α -淀粉酶(α -AL)活性检测试剂盒,上海索莱宝生物科技有限公司;所有化学试剂均为分析纯级。

1.2 设备与仪器

超声波清洗机(SK6210HP),上海科导超声仪器有限公司;冷冻高速离心机(Biofuge Stratos),美国THERMO;紫外-可见光分光光度计(BioTek, VT),美国伯腾仪器有限公司;扫描电子显微镜(Gemini 300, ZEISS),卡尔蔡司(上海)管理有限公司;傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS5, Thermo Scientifi),美国赛默飞世尔科技公司;拉曼光谱仪(HORIBA HR Evolution),上海巨纳科技有限公司;X射线衍射仪(D8 Venture),德国布鲁克公司;差示扫描量热仪(Q20, TA Instruments),沃特世科技(上海)有限公司;3D快速黏度分析仪(Newport Scientific),澳大利亚纽波特科学公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发芽糙米样品的制备 选取胚保存完好的完整糙米开展试验。将糙米置于28℃的培养箱中浸种6h即为对照组(BR)。用超声波清洗机进行超声波处理,频率为53 Hz,设置温度为28℃,超声时间为20 min,即为超声组(UBR)。将对照组和超声组的糙米种子置于28℃培养箱中,避光培养36 h后,取样分别为发芽组(GBR)和超声协同发芽组(UGBR)。

1.3.2 发芽糙米淀粉的提取 将不同处理组发芽糙米样品用蒸馏水清洗3次,吸干水分,一小部分经研磨后作为鲜样用密封袋放置于-20℃的条件下保存。其余样品置于45℃的烘箱中干燥12 h,经研磨、过筛(80目)得到发芽糙米粉。将发芽糙米粉(10.0 g)均匀地分散在50 mL的NaOH(2 g/L)溶液中,在室温下缓慢振荡1 h以软化胚乳。然后,将溶液在3 600 g下离心5 min,去除顶部的黄色层和底部的沉积物,保留中间白色层,该过程重复至少3次,直到淀粉样品中没有杂质。最后,加

入蒸馏水进行清洗,样品摇匀后在3 600 g下离心5 min,将白色层放入45℃的烘箱中干燥12 h,干燥后过筛(200目),分别得到对照糙米淀粉(BS)、超声糙米淀粉(UBS)、发芽糙米淀粉(GBS)、超声协同发芽糙米淀粉(UGBS)。

1.3.3 总淀粉含量 发芽糙米的总淀粉含量参照淀粉检测试剂盒(BC0700, Solarbio, China)的说明书进行测定。称取鲜样(50 mg),与1 mL洗脱液充分混匀,水浴处理(80℃, 30 min),3 000×g离心5 min,保留沉淀并加入蒸馏水(500 μ L)充分混匀,水浴糊化(95℃, 15 min),加入1 mL提取液充分混匀,3 000×g离心10 min。取上清液进行适当稀释并在620 nm处检测其吸光度。葡萄糖标准液制备标准曲线。

1.3.4 α -淀粉酶活性测定 采用 α -淀粉酶(α -AL)活性检测试剂盒(BC0610, Solarbio, China)测定发芽糙米中 α -淀粉酶的活性。将鲜样样品(0.1 g)与0.8 mL蒸馏水中进行均质,在室温下进行离心(6 000×g, 10 min)。上清液(淀粉酶原液)用于 α -淀粉酶活性测定,并在540 nm处读取吸光度值。标准曲线绘制和 α -淀粉酶活性计算参照说明书。

1.3.5 还原糖含量的测定 采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法进行还原糖含量测定:准确称取鲜样(0.5±0.01 g)溶于10 mL蒸馏水中,在50℃下孵育30 min,3 600×g下离心5 min。将得到的上清液(1 mL)与DNS(2 mL)混匀,100℃煮沸10 min,迅速冷却,加入去离子水,使其总体积为20 mL,测定540 nm处的吸光度。

1.3.6 淀粉颗粒微观结构 参照Liu等^[13]的研究方法,采用扫描电子显微镜分析糙米淀粉样品的微观结构。将均匀附着淀粉样品的导电双面碳带放置在样品台上,喷金。在加速电压10 kV,2 000倍和5 000倍放大倍率下观察并拍摄淀粉的形貌特征图像。

1.3.7 淀粉短程有序分子结构分析 采用衰减全反射技术检测淀粉的短程分子结构,将溴化钾与样品按1:100的比例制成薄圆片,在4 000~400 cm^{-1} 的扫描范围内,4 cm^{-1} 的分辨率条件下,累计扫描60次。所获光谱的基线校正范围为1 200~950 cm^{-1} 。并通过记录吸光度的高度,对反卷积光

谱进行 R1047/1022 处的强度测量。用 R1047/1022 的比值来研究淀粉的短程有序结构。以溴化钾为背景,记录每个光谱。

1.3.8 结晶性质测定 测量前,所有样品在饱和氯化钠干燥器中保存 1 周,以达到恒定的含水量,并配备 Cu-K α 辐射($\lambda = 1.5406\text{\AA}$)。用 40 kV 电压和 40 mA 电流对淀粉样品进行扫描,扫描速率为 10 °/min。衍射角(2θ)的扫描范围为 5°~90°,步长为 0.033°。淀粉样品的相对结晶度(RC)计算公式如下:

$$RC(\%) = A_c / (A_c + A_a) \times 100$$

式中: A_c 为结晶态区域相对面积; A_a 为非晶态区域相对面积。

1.3.9 淀粉糊的热力学性质测定 参照 Wang 等^[14]的研究方法略作修正,采用差示扫描量热仪分析糙米淀粉样品的热特性。准确称取(0.3±0.01 g)淀粉样品,加入 0.9 mL 的无菌水充分混匀。在热分析前,将淀粉样品放置在 4 °C 条件下平衡 24 h。取 20 μ L 液体样品放置在封闭的液体坩埚中,以 10 °C/min 的升温速率从 30 °C 升温至 110 °C。并以空坩埚作为参考,根据吸热曲线,确定糊化参数。

1.3.10 糊化黏度特性测定 准确称取淀粉样品 0.3 g,加入 25 mL 无菌水进行充分混匀。黏度值在快速黏度单位(RVU)中定义。

1.3.11 统计分析 每组试验均测定 3 次平行,结果以平均值±标准差(SD)表示。试验数据采用 SPSS21、Origin 2021 (Origin Lab, USA) 和 Tew

(Thermal Cycle for Windows)软件进行处理。

2 结果与讨论

2.1 α -淀粉酶活性、淀粉含量和还原糖含量的分析

随着萌芽技术的不断创新与发展,萌芽谷物已经逐渐成为健康功能类食品市场中的新兴趋势^[15]。在谷物萌发过程中,活化的 α -淀粉酶对淀粉的水解起着决定性作用。如表 2 所示,与 BR 相比,GBR 和 UGBR 的 α -淀粉酶活性增加,分别增长了 0.6 倍和 0.9 倍。这表明超声波协同发芽处理显著提高了淀粉中的 α -淀粉酶活性,增加了 α -淀粉酶对糙米淀粉的作用结果,该结果可能与减少糙米的蒸煮时间并改善糙米的食用品质密切相关。

淀粉是发芽谷物籽粒中主要的营养成分,在萌发过程中淀粉降解通常是由酶活性增加引起的^[16]。发芽后(36 h),GBS 和 UGBS 的总淀粉含量均呈现下降趋势,与 BR 相比分别下降了 8.5% 和 16.2%(表 1)。这是因为超声波处理增加了种子内部温度,诱导酶活力发生变化,加快淀粉等物质的分解和转换速率,因此表现为淀粉含量下降^[17]。与 BR 相比,UBR、GBR 和 UGBR 的还原糖含量分别提高了 1.0 倍、10.5 倍和 12.0 倍。活化的 α -淀粉酶会使二氧糖苷和糖苷键的氧之间的糖苷键发生断裂,产生更多的还原糖^[18]。因此,超声波协同发芽处理可以通过提升谷物的内部温度和 α -淀粉酶活力,进而加快淀粉水解为还原糖。

表 1 各组糙米面粉的理化指标

Table 1 Physical and chemical indexes of brown rice flour in each group

样品名称	BS	UBS	GBS	UGBS
α -淀粉酶活性/(U/g)	3.3 ± 0.1 ^c	3.4 ± 0.1 ^c	5.3 ± 0.1 ^b	6.4 ± 0.0 ^a
淀粉含量/(g/100 g)	52.0 ± 3.1 ^a	51.5 ± 2.5 ^a	47.6 ± 2.5 ^b	43.6 ± 0.5 ^c
还原糖含量/(g/100 g)	0.2 ± 0.1 ^c	0.4 ± 0.1 ^c	2.3 ± 0.1 ^b	2.6 ± 0.1 ^a

注:采用 Duncan's multiple range test 方法分析,同一列不同字母表示显著性差异($P < 0.05$),下同。

2.2 糙米淀粉的表观结构分析

糙米淀粉的表观结构如图 1 所示。在发芽前(0 h),BS 和 UBS 颗粒在 5 000 放大倍率下呈不规则多面体状,表面相对光滑,颗粒完整。然而,在发芽后(36 h),GBS 颗粒表面失去了原本的均匀性和完整性,这是因为发芽处理导致吸附在颗粒表

面的淀粉酶发生催化反应,表面结构被破坏^[19]。UGBS 的颗粒表面较 GBS 相比更加粗糙,凹坑和孔隙数量更多,这说明超声波协同处理可以破坏糙米表层的致密程度。根据 Luo 等^[20]的研究可以推断活化后的 α -淀粉酶可以优先渗透到颗粒内部,并优先攻击非晶态区域,从而在萌发过程中使

颗粒表面产生更多的凹坑和孔隙。Yang 等^[21]研究发现采用超声波处理后,糙米的表观结构被破坏,皮层出现更多的裂痕和孔隙。本研究表明发芽会破坏淀粉的内部结构,使其产生贯通淀粉颗粒内

外的孔隙,超声波协同发芽处理可以有效提升发芽糙米中 α -淀粉酶活性,进而加快淀粉颗粒破裂失去原有的完整性。

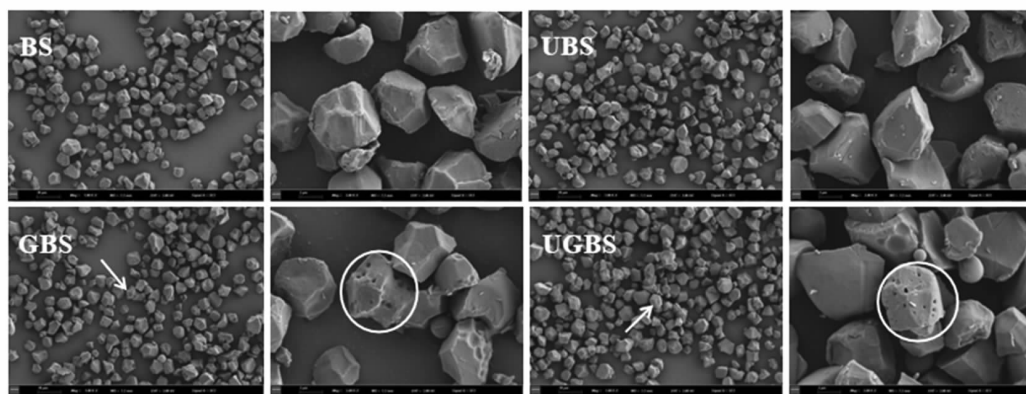


图 1 各组糙米淀粉的扫描电镜图(2 000 \times 和 5 000 \times)

Fig.1 Scanning electron microscopy of brown rice starch in each group (2 000 \times and 5 000 \times)

2.3 糙米淀粉的短程有序分子结构

在本研究中,采用傅里叶变换红外(ATR-FTIR)分析超声波协同发芽处理对糙米淀粉短程分子结构的影响。波长在 1 047, 1 022 cm^{-1} 处分别对应淀粉聚集态结构中的短程有序结构和无规则线团结构。由图 2 可知,各组糙米淀粉的红外光谱具有相似的特征峰,这说明超声波协同发芽处理未使糙米淀粉产生新的官能团,仅属于物理改性。

通过去卷积化处理计算的峰强度比值(R1047/1022)如表 2 所示,该比值反映淀粉分子的短程有序度,其值越高则表示有序度越高^[22]。由表 2 可知,随着萌发时间延长至 36 h,GBS 和 UGBS 的 R1047/1022 值较 BS 有所降低,分别下降了 6.7% 和 16.0%,说明发芽后淀粉颗粒表面的有序度下降,淀粉结构由有序向无序转变。超声波协同发芽处理后淀粉颗粒的有序度受到更大的破坏,这是由于超声波作用使淀粉分子链被破坏,导致内部螺旋结构解旋或发生不规则排列,从而使短

程有序度降低^[23]。

2.4 糙米淀粉的长程分子结构

淀粉分子是由有序结晶区和无序非结晶区组成的天然结晶高聚物,结晶类型则与分子排列规律有关,规则排列时形成结晶区,而杂乱排列时形成非结晶区。因此,淀粉的结晶性质可以通过结晶区与非晶区特征的强度、比例以及变化趋势进行对比分析^[24]。本研究采用 X-射线衍射(XRD)图谱分析了糙米淀粉样品的晶体类型,从而探究超声波协同发芽处理对糙米淀粉结晶特性的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可知,糙米淀粉的衍射图谱总体峰位无明显差异,均在 15°, 17°, 18° 和 23° 附近有明显的衍射特征,且在 17° 和 18° 处观察到相连的双峰,属于 A 型晶体结构^[25]。说明发芽处理和超声波协同发芽处理未改变糙米淀粉的衍射峰的位置和晶体结构类型,这与 A 型晶体淀粉结构中紧密排列的双螺旋结构有关。该结果与 Hu 等^[26]采用超声处理马铃薯淀粉和小米淀粉的研究结果一致。如表 3 所示,比较了超声波、发芽和超声波协

表 2 各组糙米淀粉的强度比、相对结晶度

Table 2 Strength ratio and relative crystallinity of brown rice starch in each group

样品名称	BS	UBS	GBS	UGBS
RC/%	13.1 \pm 0.1 ^a	13.0 \pm 0.3 ^a	11.3 \pm 0.7 ^b	9.55 \pm 0.2 ^c
R1047/1022	1.5 \pm 0.0 ^a	1.5 \pm 0.0 ^a	1.4 \pm 0.0 ^b	1.26 \pm 0.1 ^c

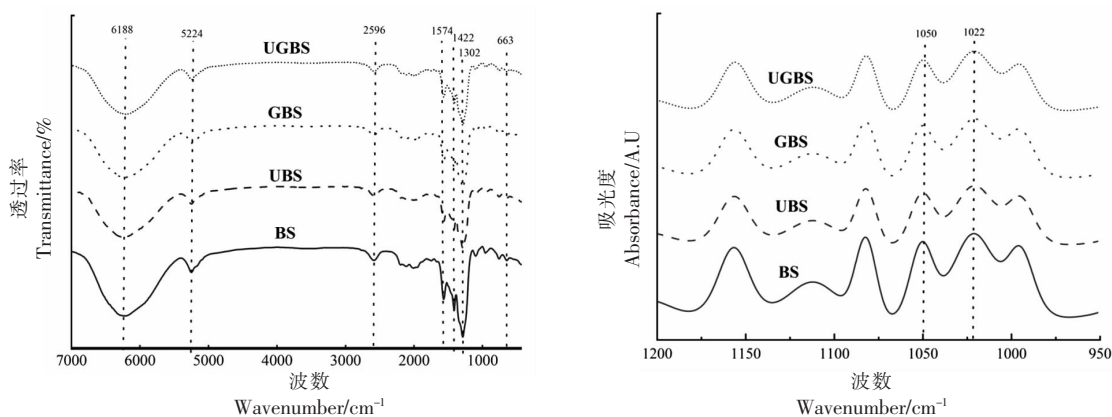


图2 各组糙米淀粉的FTIR光谱图

Fig.2 FTIR spectrum of brown rice starch in each group

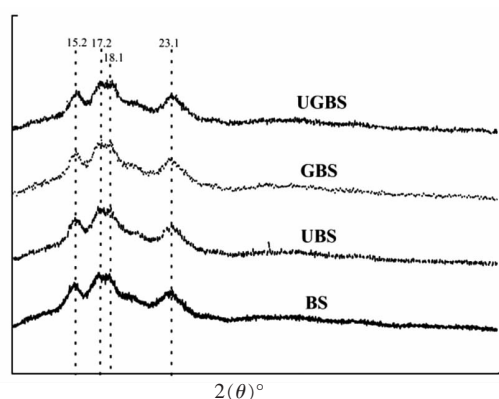


图3 各组糙米淀粉的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of brown rice starch in each group

同发芽处理对糙米淀粉相对结晶度(RC)的影响。UBS、GBS和UGBS的RC值较BS分别降低了0.8%、13.7%和27.1%，说明发芽处理会破坏糙米淀粉颗粒的有序结晶结构。在发芽绿豆和发芽藜麦的研究中也发现了类似的结果^[27-28]。超声波协同发芽处理后RC下降得更明显，这是由于超声波可以破坏淀粉的双螺旋结构，使淀粉结构的无定形结构有所增加，从而导致RC显著降低^[29]。由此可见超声波协同发芽处理破坏了糙米淀粉的结晶结构，但破坏程度还不足以改变糙米淀粉的结晶类型。

2.5 淀粉的热力学特性

图4所示为不同处理下糙米淀粉的差示扫描热谱图。起始温度(T_0)和终止温度(T_c)在一定程度上反映了淀粉颗粒中双螺旋结构或晶体结构的完整程度。双螺旋结构的破坏被认为是影响糊化

焓(ΔH)的主要原因,因此 ΔH 常用来判断单位质量的淀粉颗粒糊化所需要吸收的热量以及被破坏的程度^[30-31]。表3结果显示,各组糙米淀粉的 T_0 、 T_p 和 T_c 均无明显变化($P > 0.05$)。前人针对淀粉热力学特性研究发现 ΔH 越高,晶体稳定性越好^[32]。由表3可知,GBS和UGBS的 ΔH 较BS分别增加了0.16倍和0.6倍。糊化焓增加的原因是发芽过程中活化的酶优先水解淀粉的无定形区域,导致双螺旋有序结构增加^[28]。超声波协同发芽处理通过提升发芽糙米中 α -淀粉酶活性,进而加快糙米淀粉的无定形区域水解,因此 ΔH 升高,热稳定性增加。综上所述,超声波协同发芽处理对糙米淀粉的有序分子结构产生了影响,这与ATR-FTIR和XRD的结果一致。

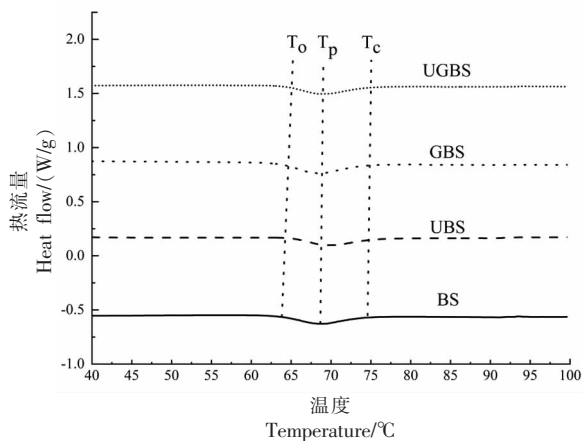


图4 各组糙米淀粉的DSC热谱图

Fig.4 DSC heat spectrum of brown rice starch in each group

表 3 各组糙米淀粉的热力学特性

Table 3 Thermal properties of brown rice starch in each group

样品名称	BS	UBS	GBS	UGBS
$T_g/^\circ\text{C}$	63.8 ± 0.3^b	64.1 ± 0.3^b	64.7 ± 0.3^{ab}	65.2 ± 0.2^a
$T_v/^\circ\text{C}$	68.6 ± 0.0^b	68.6 ± 0.1^b	68.9 ± 0.16^{ab}	69.0 ± 0.1^a
$T_c/^\circ\text{C}$	74.5 ± 0.4^a	74.6 ± 0.4^a	74.8 ± 0.2^a	74.9 ± 0.3^a
$\Delta H/(\text{J/g})$	2.5 ± 0.0^c	2.6 ± 0.1^c	2.9 ± 0.1^b	4.0 ± 0.2^a

2.6 糙米淀粉的糊化特性分析

淀粉的糊化参数是用于评价产品蒸煮食用品质和反映淀粉的糊化过程的重要指标,该指标受淀粉结晶度、峰值黏度等因素的影响^[33-34]。由表 4 可知,发芽 36 h 后,GBS 和 UGBS 的峰值黏度、谷值黏度、终值黏度均呈现下降趋势。因为糙米在发芽过程中由于内部淀粉酶的作用,不能维持颗粒的完整性,具有多孔形态结构的淀粉颗粒更容易水解,从而失去抗膨胀能力,导致糙米淀粉的峰值黏度和谷值黏度变小^[35-36]。超声波协同发芽处理后糙米淀粉黏度下降的更为显著,这主要是与协同处理后提高其内部淀粉酶活性进而破坏糙米淀粉

的结构有关。崩解值和回生值分别反映淀粉颗粒的热稳定性能力和老化能力^[37]。GBR 和 UGBR 的崩解值较 BS 显著降低,分别减少了 10.1%、22.4%,表明发芽处理可使糙米淀粉的热稳定性增强,老化能力减弱,超声波协同处理可以显著增强其稳定性。由于超声波处理使糙米淀粉内部淀粉酶活性增强,破坏其结晶结构,减少了支链淀粉含量,从而导致淀粉的崩解值降低,热稳定性增强^[21]。王琦等^[38]采用超声处理对小米淀粉糊化特性的影响也有类似的结果。超声波作用使淀粉内部的双螺旋结构暴露更多的羟基,增加了与水分子之间的相互作用,保水性增强,因此回生值降低^[39]。

表 4 各组糙米淀粉糊化参数

Table 4 Starch gelatinization parameters of brown rice in each group

	BS	UBS	GBS	UGBS
峰值黏度/cP	$1\ 685.0 \pm 22.6^a$	$1\ 692.7 \pm 10.4^a$	$1\ 573.7 \pm 15.3^b$	$1\ 497.4 \pm 9.9^c$
谷值黏度/cP	686.3 ± 14.6^a	684.0 ± 11.2^a	620.3 ± 18.5^b	573.0 ± 5.6^c
最终黏度/cP	$1\ 569.7 \pm 27.6^a$	$1\ 569.7 \pm 13.1^a$	$1\ 447.3 \pm 18.6^b$	$1\ 410.7 \pm 8.6^c$
崩解值/cP	$1\ 051.7 \pm 13.0^a$	$1\ 053.7 \pm 11.4^a$	946.0 ± 47.7^b	816.0 ± 6.3^c
回生值/cP	929.7 ± 13.3^a	932.3 ± 7.5^a	853.0 ± 1.0^b	786.3 ± 6.2^c
黏贴温度/ $^\circ\text{C}$	77.2 ± 0.7^a	77.1 ± 0.3^a	76.6 ± 0.4^a	76.9 ± 0.3^a

3 结论

本研究以糙米淀粉为研究对象,通过扫描电子显微镜、XRD、DSC 等方法探究了超声波协同发芽处理对糙米淀粉结构特性和理化性质的变化规律。研究发现,超声波协同发芽处理提升糙米中 α -淀粉酶的活性,进而促进了淀粉转化为还原糖;破坏糙米糙米淀粉的表观结构,在其颗粒表面形成较多的凹坑和孔隙,但仍保持着原有的形貌特征;使糙米淀粉颗粒表面的短程有序化程度降低,主要是通过破坏淀粉分子内部的双螺旋结构,使淀粉结构由有序向无序转变;不会改变糙米淀粉

的晶体类型,但会对淀粉结晶特性有显著影响($P < 0.05$);显著影响了糙米淀粉的糊化特性,使得糙米淀粉的峰值黏度、崩解值和回生值均下降,这说明超声波协同发芽处理使淀粉的热稳定性增强、老化能力减弱;对糙米淀粉内部的双螺旋结构造成破坏,从而使糊化焓增加,热稳定性增加,因此影响了糙米淀粉的热力学性质。综上所述,本研究解析了超声波协同发芽处理对糙米淀粉的结构特性与理化性质的影响,为糙米淀粉产品的改良和发芽全谷物食品的开发提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Q F. Purple tomatoes, black rice, and food security[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2021, 22(7): 414–414.
- [2] LUO X Y, TAO Y, HAN Y B, et al. Effect of static magnetic field treatment on γ -aminobutyric acid content and sensory characteristics of germinated brown rice cake[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134709.
- [3] 高闪闪. 等离子处理对淀粉多尺度结构及苦荞淀粉-槲皮素互作的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
GAO S S. Study on multi-scale structure of cold plasma treated starch and the effect on Tartary buckwheat starch-quercetin interaction[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [4] 崔添玉, 辛嘉英, 王广交, 等. 物理法改性淀粉的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(2): 17–19.
CUI T Y, XIN J Y, WANG G J, et al. Research progress on physical modification of starch[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(2): 17–19.
- [5] 欧阳群富. 超声处理对不同晶型淀粉的结构及理化性能的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
OUYANG Q F. Effect of ultrasonic treatment on structure and physicochemical properties of starch with different crystal forms [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.
- [6] 陈林林, 宋佳琪, 李伟, 等. 非热加工技术对淀粉结构特性影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(7): 380–393.
CHEN L L, SONG J Q, LI W, et al. Research progress on the effect of non-thermal processing technology on the structural properties of starch[J]. *Food Science*, 2023, 44(7): 380–393.
- [7] 梁云浩, 王周利, 蔡瑞, 等. 超声波处理对糙米淀粉结构与理化性质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(19): 36–43.
LIANG Y H, WANG Z L, CAI R, et al. Effect of ultrasonic treatment on the structural characteristics and physicochemical properties of brown rice starch [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(19): 36–43.
- [8] 朱创, 杨丽, 肖登荣, 等. 超声波辅助处理对发芽糙米营养及食用品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 48–54.
ZHU C, YANG L, XIAO D R, et al. Effects of ultrasonic-assisted treatment on nutrition and edible quality of germinated brown rice [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(24): 48–54.
- [9] WANG H W, XU K, MA Y, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 63: 104868.
- [10] KAUR H, GILL B S. Effect of high-intensity ultrasound treatment on nutritional, rheological and structural properties of starches obtained from different cereals [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 126: 367–375.
- [11] 李忍, 吴娜娜, 李志江, 等. 发芽全谷物的营养品质及功能特性[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(12): 183–190.
LI R, WU N N, LI Z J, et al. Nutritional quality and functional characteristics of sprouted whole grain [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(12): 183–190.
- [12] ZHANG G C, XU J X, WANG Y Q, et al. Combined transcriptome and metabolome analyses reveal the mechanisms of ultrasonication improvement of brown rice germination[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 91: 106239.
- [13] LIU X L, HANG J, YANG X J, et al. Combined molecular and supramolecular structural insights into pasting behaviors of starches isolated from native and germinated waxy brown rice [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 283: 119148.
- [14] WANG H W, XIAO N Y, DING J T, et al. Effect of germination temperature on hierarchical structures of starch from brown rice and their relation to pasting properties [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 965–972.
- [15] 高琨, 谭斌, 汪丽萍, 等. 萌芽全谷物的研究现状、问题与机遇[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(2): 71–80.
GAO K, TAN B, WANG L P, et al. Research status, problems and opportunities of sprouting whole grains[J]. *Cereals, Oils and Food Science and Technology*, 2021, 29(2): 71–80.
- [16] YANG B, YIN Y J, LIU C, et al. Effect of germination time on the compositional, functional and an-

- tioxidant properties of whole wheat malt and its end-use evaluation in cookie-making[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349: 129125.
- [17] DING J, HOU G G, DONG M, et al. Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 41: 484-491.
- [18] CUI R B, ZHU F. Effect of ultrasound on structural and physicochemical properties of sweetpotato and wheat flours [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 66: 105118.
- [19] KALITA D, SARMA B, SRIVASTAVA B. Influence of germination conditions on malting potential of low and normal amylose paddy and changes in enzymatic activity and physico chemical properties [J]. *Food Chemistry*, 2017, 220: 67-75.
- [20] LUO X Y, LI D D, TAO Y, et al. Effect of static magnetic field treatment on the germination of brown rice: changes in α -amylase activity and structural and functional properties in starch[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132392.
- [21] YANG X, LI Y L, LI S Y, et al. Effects of ultrasound pretreatment with different frequencies and working modes on the enzymolysis and the structure characterization of rice protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 19-28.
- [22] HONG J, ZENG X A, BUCKOW R, et al. Structural, thermodynamic and digestible properties of maize starches esterified by conventional and dual methods: Differentiation of amylose contents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83(19): 419-429.
- [23] AHMED J, SINGH A, RAMASWAMY H S, et al. Effect of high-pressure on calorimetric, rheological and dielectric properties of selected starch dispersions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 103(4): 12-21.
- [24] 姚慧. 板栗抗性淀粉制备工艺及其特性与应用研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- YAN H. Preparation, physicochemical properties and application research of chestnut resistant starch [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [25] 谢正飞. 镉大米中淀粉的分离及其改性淀粉的制备 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- XIE Z F. Preparation and modification of the starch from cadmium-contaminated rice [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [26] HU A J, LI Y, ZHENG J. Dual -frequency ultrasonic effect on the structure and properties of starch with different size[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 106: 254-262.
- [27] LIU Y, SU C, SALEH A S M, et al. Effect of germination duration on structural and physicochemical properties of mung bean starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154: 706-713.
- [28] 邢宝. 发芽处理对藜麦淀粉结构和理化性质的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- XING B. Effect of germination treatment on structure and physicochemical properties of quinoa starch [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [29] 张志华. 超声波处理对淀粉结构与性质的影响研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
- ZHANG Z H. Effect of ultrasonic treatment on structure and properties of starch [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2012.
- [30] 张奎亮, 代养勇, 侯汉学, 等. 超声处理对马铃薯淀粉结构特性及理化性质的影响 [J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 128-134.
- ZHANG K L, DAI Y Y, HOU H X, et al. Effect of ultrasonic treatment on structure and physicochemical properties of potato starch [J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 128-134.
- [31] SEN S, CHAKRABORTY R, KALITA P. Rice-not just a staple food: A comprehensive review on its phytochemicals and therapeutic potential[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 265-285.
- [32] 白婷, 靳玉龙, 朱明霞, 等. 超声波处理对青稞淀粉理化特性的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(9): 60-66.
- BAI T, JIN Y L, ZHU M X, et al. Effects of ultrasonic treatment on physicochemical properties of highland barley starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(9): 60-66.
- [33] WANI I A, FAROOQ G, QADIR N, et al. Physico-chemical and rheological properties of Bengal gram (*Cicer arietinum* L.) starch as affected by high temperature short time extrusion[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 131: 850-857.
- [34] SOMBOONCHAN S, LUBBERS S, ROUDAUT G.

- Water and temperature contribution to the structuration of starch matrices in the presence of flavour[J]. Food Chemistry, 2016, 195: 79–86.
- [35] GUTIÉRREZ-OSNAYA L, HERNÁNDEZ-URIBE J, CASTRO-ROSAS J, et al. Influence of germination time on the morphological, morphometric, structural, and physicochemical characteristics of Esmeralda and Perla barley starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 262–270.
- [36] STEFFOLANI M E, LEÓN A E, PÉREZ G T. Study of the physicochemical and functional characterization of quinoa and kañiwa starches[J]. Starch/Stärke, 2013, 65(11/12): 976–983.
- [37] 王娜, 吴娜娜, 谭斌, 等. 发芽糙米粉理化性质研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(18): 99–102, 112. WANG N, WU N N, TAN B, et al. Study on physicochemical properties of germinated brown rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(18): 99–102, 112.
- [38] 王琦, 王周利, 蔡瑞, 等. 超声处理对糙米淀粉的结构与理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(1): 60–65. WANG Q, WANG Z L, CAI R, et al. Effect of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of brown rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(1): 60–65.
- [39] 陆兰芳, 扎西拉宗, 吴进菊, 等. 超声处理对小米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 60–67. LU L F, ZAXI L Z, WU J J, et al. Effects of ultrasonic treatment on the structure and physicochemical properties of millet starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 60–67.

Effects of Ultrasonication and Germination Synergistic Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Brown Rice Starch

Zhang Guangchen, Sun Xue, Xu Xinyue, Hua Dong, Liu He*

(College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning)

Abstract In order to explore the effects of ultrasonication and germination synergistic treatment on the structure and physicochemical properties of brown rice starch, spectroscopic analysis and electron microscopy were employed to compare the changes in α -amylase activity, starch morphology, crystalline structure, and physicochemical properties across four groups: untreated brown rice, ultrasonication and germination synergistic treatment brown rice, germinated brown rice, and ultrasound-assisted germinated brown rice. The results showed that ultrasonication and germination synergistic treatment increased the α -amylase activity and reducing sugar content in germinated brown rice by 0.9 times and 12.0 times, respectively; while decreased the starch content by 16.2% compared with brown rice. The synergistic role of ultrasonication and germination contributed to more pits and pores in the surface of brown rice starch granules, but still maintained the original morphological characteristics. The treatment did not significantly change the crystal form of brown rice starch, but remarkably decreased the relative crystallinity ($P < 0.05$). Ultrasonication and germination synergistic treatment had a significant effect on the gelatinization viscosity of brown rice starch, where the gelatinization enthalpy value was increased by 0.6 times, and the breakdown viscosity was reduced by 22.4%. In conclusion, synergistic treatment of ultrasonication and germination significantly enhanced the α -amylase activity, and further affected the structural characteristics and physicochemical properties of brown rice starch. These findings suggest that ultrasonication and germination synergistic treatment enhances α -amylase activity in brown rice, subsequently altering starch structural characteristics and physicochemical properties, thereby providing a theoretical foundation for the improvement of brown rice starch products and the development of germinated whole grain foods.

Keywords ultrasonication and germination synergistic treatment; brown rice starch; α -amylase activity; structural characteristics; physicochemical properties