

## 21 种宁夏大米淀粉分子结构及特性的比较分析

贺捷群<sup>1</sup>, 辛世华<sup>2</sup>, 刘慧燕<sup>\*1</sup>, 方海田<sup>1</sup>, 杨小萍<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 食品与葡萄酒学院/宁夏食品微生物应用技术与安全控制重点实验室, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏工商职业技术学院 旅游管理学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为探索宁夏稻区不同品种大米淀粉分子在结构及特性上的差异, 采用碱法提取大米淀粉后, 通过 X 射线衍射仪 (X-ray diffractometer, XRD)、快速黏度测定仪 (rapid viscosity analyzer, RVA) 和傅里叶红外光谱仪 (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 测定分析 21 种宁夏稻区不同品种大米淀粉分子的晶型结构、结晶度、分子有序性及糊化特性。结果表明: 所有大米淀粉分子均为 A 型结构; 不同品种大米淀粉分子结晶度和有序性存在差异, “宁梗 28 号” 结晶度最高, 为 32.96 %; “水稻 3” 在 1 748 cm<sup>-1</sup> 和 2 852 cm<sup>-1</sup> 处产生特征吸收峰; 所有大米淀粉 RVA 曲线均呈现先上升后下降再上升的变化趋势, 其中“宁梗 41 号” 黏滞性较强, 热稳定性和耐剪切性较差, “843” 黏滞性较差, “天降优 169” 有较好的热稳定性和耐剪切性; “宁梗 41 号” “稻花香 4 号” “宁香” 的回生值较高。研究结果可为宁夏稻区不同大米品种分类及精细加工提供理论依据。

**关键词:** 大米淀粉; 结构; 结晶区域; 糊化特性; 回生

中图分类号: TS 213.3

文章编号: 1673-1689(2023)10-0100-07

DOI: 10.12441/spyswjs.20220224002

## Comparative Analysis of Starch Molecular Structure and Properties of 21 Rice Varieties in Ningxia

HE Jiequn<sup>1</sup>, XIN Shihua<sup>2</sup>, LIU Huiyan<sup>\*1</sup>, FANG Haitian<sup>1</sup>, YANG Xiaoping<sup>2</sup>

(1. School of Food & Wine/Ningxia Key Laboratory for Food Microbial-Applications Technology and Safety Control, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Tourism Management, Ningxia Vocational Technical College of Industry and Commerce, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to explore the differences in molecular structure and characteristics of rice starch from different varieties of rice in Ningxia, the starch was extracted using the alkaline method. The crystal structure, crystallinity, molecular order, and gelatinization properties of rice starch from 21 different varieties in Ningxia were detected and analyzed through X-ray diffractometer (XRD), rapid viscosity analyzer (RVA), and Fourier transform infrared spectrometer (FTIR). The results showed that all rice starch molecules had an A-type structure. Different varieties of rice exhibited variations in crystallinity and molecular order, with ‘Ningeng 28’ having the highest crystallinity at 32.96%. ‘Rice 3’ displayed characteristic absorption peaks at 1 748 cm<sup>-1</sup> and 2 852 cm<sup>-1</sup> in the infrared

收稿日期: 2022-02-24 修回日期: 2022-03-24

**基金项目:** 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2018BBF02010); 宁夏食品微生物应用技术与安全控制重点实验室平台建设项目 (2019BDC05009, 2019YDDF0062); 宁夏工商职业技术学院工程技术研发中心项目 (NXGSYFZX2020003, NXGSYFZX2020006)。

**\* 通信作者:** 刘慧燕 (1977—), 女, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事农产品生物加工技术研究。E-mail: liuhy@nxu.edu.cn

spectrum. All RVA curves of rice starch exhibited the trend of increase initially, followed by a decrease, and increase later. Among them, 'Ninggeng 41' had the higher viscosity but poor thermal stability and shear resistance, while '843' had low viscosity and 'Tianjiangyou 169' showed good thermal stability and shear resistance. The varieties 'Ninggeng 41', 'Daohuaxiang 4', and 'Ningxiang' demonstrated elevated levels of retrogradation. The results could provide a theoretical basis for the classification and fine processing of different rice varieties in Ningxia.

**Keywords:** rice starch, structure, crystalline region, gelatinization, retrogradation

大米占我国粮食消费的 60% 以上,是最主要的口粮之一<sup>[1-3]</sup>。宁夏稻区气候干燥,生产的大米表面光滑,晶莹剔透,入口黏而不腻,口感极佳,是优质粳稻最佳生态产区<sup>[4-5]</sup>。大米的主要成分是淀粉,其占总物质的 75%,是提取淀粉的主要原料之一<sup>[6]</sup>。大米淀粉在所有天然淀粉中,颗粒最小,在水相中有良好的分散性<sup>[7]</sup>。同时,还具有色白、易消化、低过敏、口感优良及糊化冻融稳定性等特征<sup>[8]</sup>。目前,周林秀等研究表明大米淀粉独特的结构和性质,可用于生产调味料、冷加工酱汁或面包馅料等,是淀粉工业发展的热点<sup>[9]</sup>。

大米淀粉品种丰富,不同品种大米淀粉之间组成和结构不同<sup>[10-11]</sup>。刘传菊等研究了大米淀粉的多尺度结构对其物化特性的影响<sup>[12]</sup>。程科等研究表明了不同品种大米淀粉分子结构的差异,其物化特性也存在较大差异<sup>[13]</sup>。马洪文等通过近红外光谱技术对宁夏 200 份育种材料的稻米胶稠度、碱消值、蛋白质含量、直链淀粉含量等进行了测定,结果表明化学分析结果与近红外光谱技术分析结果相近<sup>[14]</sup>。

作者选择 21 个宁夏大米品种,通过 X 晶体射线衍射(XRD)和傅里叶红外光谱(FTIR)测定大米淀粉分子的晶型结构、结晶度和分子有序性,然后通过快速黏度测定仪(RVA)对淀粉的糊化和回生特性进行研究,分析不同品种的大米淀粉分子在结构及特性上的差异,为宁夏不同大米品种的分类及精细加工提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

21 种不同品种的大米淀粉(宁梗 28 号、宁梗 41 号、宁梗 48 号、宁梗 50 号、宁梗 54 号、宁梗 55 号、松辽 6 号、松辽 7 号、花 147、花 159、宁香、香优

108、富源 4 号、天降优 169、稻花香 4 号、水稻 3、水稻 D10、5 关 19、843、18HJ-24、177J-13): 均产自宁夏。

### 1.2 仪器与设备

JDMZ 100 稻谷出米率检测仪: 北京东孚久恒仪器技术有限公司产品; LTJM-2099 极速冷却型精米机: 浙江伯利恒仪器设备有限公司产品; 高速万能粉碎机: 天津市泰斯特仪器有限公司产品; XRD-7000 衍射仪: 日本岛津公司产品; NICOLET 6700 红外光谱分析仪: Thermo Fisher Scientific 公司产品; 快速黏度测定仪(RVA): 波通瑞华科学仪器(北京)有限公司产品。

### 1.3 试验条件

**1.3.1 大米粉的制备** 稻谷筛出杂质后,经烘干去除水分,放入到碾米机内。稻谷因胶辊的挤压,使谷壳被压破脱落。再将初步与稻壳分离出来的糙米,进入到精米机中,去除表面黄色的麸皮。采用高速粉碎后,过 100 目筛,得到大米粉。

**1.3.2 大米淀粉的提取** 参考唐雅璐等的方法并修改<sup>[15]</sup>,称取 100 g 经石油醚浸泡脱脂的大米粉于质量分数 0.2% NaOH 中,8 000 r/min 离心 5 min 去除上清液,取沉淀中间层的白淀粉,水洗至中性后于 40 °C 烘干,得到大米淀粉。

**1.3.3 淀粉颗粒 X 射线衍射仪测定** 根据吴丽荣等<sup>[16]</sup>的方法并加以修改,通过 X 射线衍射仪测定大米淀粉样品的晶体结构,样品于烘箱 45 °C 下干燥 6 h。在 40 kV 和 40 mA 的条件下 Cu-K $\alpha$  辐射(K- $\alpha_1=1.540\ 598$ , K- $\alpha_2=1.544\ 426$ , K- $\alpha_2/\alpha_1=0.5$ ),发散狭缝固定为 0.38 mm。扫描范围为 4°~40°(2 $\theta$ )。用 Origin 2021 绘制峰图,并计算相对结晶度( $X_c$ )。

$$X_c = \frac{A_c}{A_a + A_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $X_c$  为相对结晶度, %;  $A_c$ 、 $A_a$  分别为 X 射线衍射图上的结晶区域和非晶区域。

**1.3.4 淀粉颗粒快速黏度仪测定** 糊化特性测定参照 GB/T 24852—2010 并修改<sup>[17]</sup>。准确称取 3.0 g 样品, 加入 25.0 mL 水于样品筒中并搅拌, 使样品分散。测试程序如下: 在初始温度为 50 °C 时保持 1 min, 然后在 3.42 min 内恒速升温至 95 °C, 3.5 min 后再以恒速在 3.48 min 内降温至 50 °C, 并保持 2 min。搅拌器在开始 10 s 内升高转动速度至 960 r/min 后, 保持转动速度为 160 r/min, 整个测试过程为 13 min。

**1.3.5 淀粉颗粒傅里叶红外光谱仪测定** 采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析 21 种大米淀粉的短程有序结构。将 21 种大米淀粉样品分别与固体 KBr 粉末混合, 压成透明小片, 用 FTIR 分光光度进行测定。在 4 000~500  $\text{cm}^{-1}$  的波数范围内扫描, 记录透射率。

## 1.4 数据分析

采用 SPSS24.0 软件进行数据分析, 用 Origin 2021 和 Design-Expert8.0.6 软件进行绘图处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 X 射线衍射分析

当 X 射线进入结晶内发生散射, 呈尖峰衍射峰和弥散衍射峰。根据衍射峰的位置, 可将淀粉的晶型结构分为 A、B 和 C 型<sup>[18]</sup>。不同品种大米淀粉的晶体结构和结晶度, 表现出不同的 XRD 图谱, 见图 1。21 种大米淀粉 X-射线衍射图的  $2\theta$  分别在 15.1°、17.1°、18.1° 及 23.0° 出现尖峰衍射峰, 表明这些淀粉是典型的 A 型结构, 与蔡沙<sup>[19]</sup>所研究的不同类型大米淀粉均为 A 型且在  $2\theta$  出现的特征衍射峰呈现一致。淀粉结晶度是表征淀粉颗粒结晶特性的一个重要参数, 它表明了晶体在淀粉中的比率<sup>[20]</sup>。不同品种大米淀粉结晶度存在差异, 而结晶区域主要分布的是支链淀粉<sup>[21]</sup>。淀粉的支链淀粉分子双螺旋结构排列较为有序, 表现为样品相对结晶度较高<sup>[22]</sup>。21 种大米淀粉的结晶度在 29.24%~32.96%, 绝大多数大米淀粉的结晶度低于 32.00%, 仅有“宁梗 28 号”“843”“水稻 3”“松辽 7 号”结晶度高于 32.00%, 其中“宁梗 28 号”结晶度最高为 32.96%; 结晶度最低是“稻花香 4 号”和“花 147”, 仅为 29.24% 和 29.30%。

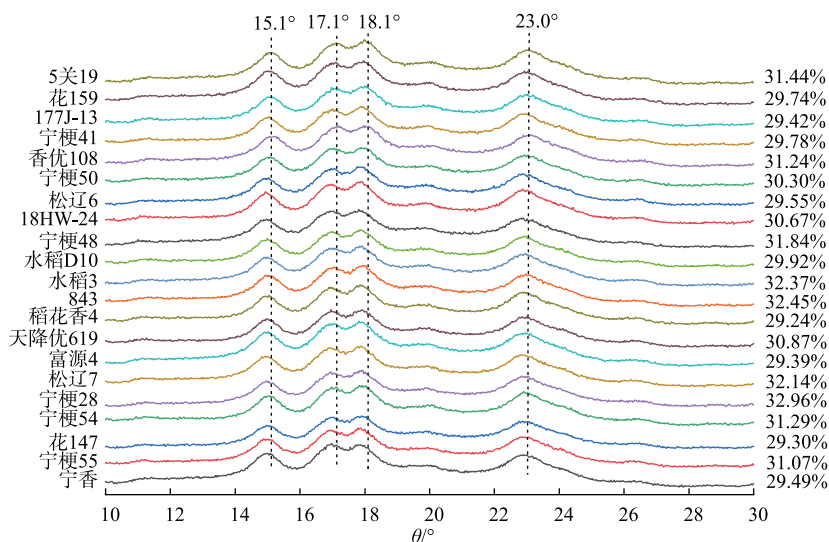


图 1 不同品种大米淀粉的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of different rice starches

### 2.2 傅里叶红外光谱分析

红外光谱对分子的构象和螺旋结构的改变十分敏感, 是检测高分子物质组成和结构的重要方法之一<sup>[23]</sup>。当淀粉中化合物的存在时, 分子振动吸收特

定波长的红外光, 从而产生吸收峰<sup>[24]</sup>。图 2 是不同品种大米淀粉的 FT-IR 图谱。所有大米淀粉分子均在 2 930  $\text{cm}^{-1}$  产生吸收峰, 属于饱和碳上的 C—H 伸缩振动, 基团类型为  $(-\text{CH}_2-)$ <sup>[25]</sup>。1 157  $\text{cm}^{-1}$  附近

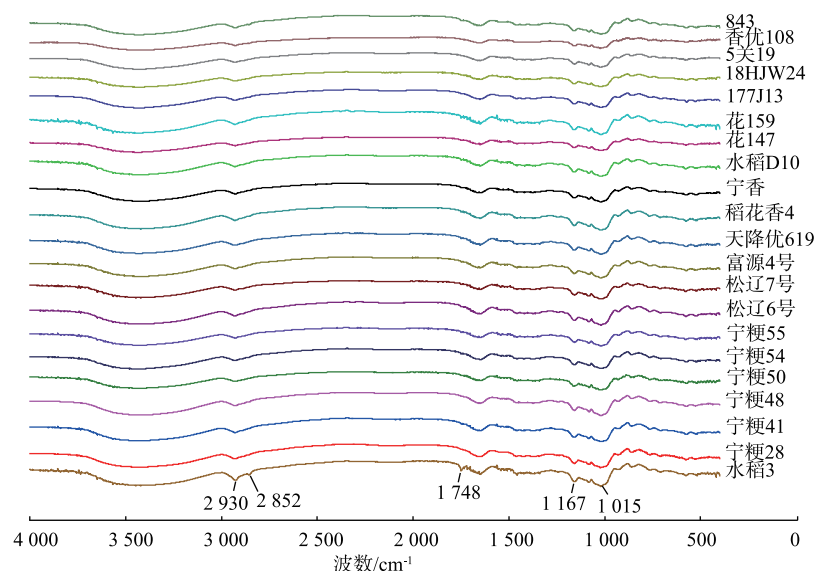


图2 不同品种大米淀粉的 FT-IR 图谱

Fig. 2 FT-IR spectrograms of different rice starches

吸收峰是无定型区的结构特征,对应淀粉分子中无规则线团结构<sup>[26]</sup>;1 047  $\text{cm}^{-1}$  则是结晶区的结构特征,对应淀粉分子中有序结构。所有大米淀粉分子均在 1 167  $\text{cm}^{-1}$  和 1 015  $\text{cm}^{-1}$  处分别产生红外吸收峰,分别为大米淀粉分子中的无定型区和有序结构。其中,“水稻 3”在 1 748  $\text{cm}^{-1}$  和 2 852  $\text{cm}^{-1}$  产生红外吸收,属于 C=O 伸缩和 O—H 键,其余样品无此吸收峰。

### 2.3 糊化特性分析

图 3 为不同品种大米淀粉的 RVA 糊化曲线,所有大米淀粉的 RVA 曲线呈先上升后下降再上升的变化,但“宁梗 41 号”和“松辽 7 号”在 500~600 s 时较其余样品呈现出上升幅度很大的变化,表现出较高的黏度值。在 800~1 000 s 时温度下降,所有大米淀粉黏度开始减小,产生明显的降落值。随着时间的增加,糊化的大米淀粉又重新排列,形成致密、高度晶化的不溶解性的淀粉分子胶束,发生回生甚至是老化<sup>[27]</sup>。其中,“天降优 169”降落值较小,回生值较其余品种最低;“宁梗 41 号”和“松辽 7 号”回生值较大(糊化曲线最后产生与谷值黏度相差较大的峰值)。

21 种大米淀粉 RVA 糊化测定获得的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值和回生值等特征参数,见表 1。一般来说,峰值黏度反映了淀粉颗粒的膨胀程度或者结合水的能力,通常峰值黏度越高,样品黏滞性越强<sup>[28]</sup>。其中,淀粉的黏滞性是预测大米

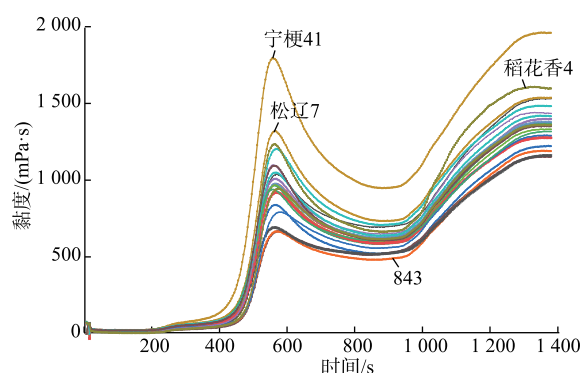


图3 不同品种大米淀粉的 RVA 糊化曲线

Fig. 3 RVA pasting curves of different rice starches

食用、蒸煮和加工品质的重要指标<sup>[29]</sup>。21 种大米淀粉的峰值黏度范围在 1 793~665  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ,其中“宁梗 41 号”最高,具有较强的黏滞性;“843”最低,表现出较差的黏滞性。谷值黏度最高为“宁梗 41 号”(948  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ),谷值黏度最低为“843”(482  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )。崩解值是指峰值黏度和谷值黏度的差值,崩解值越大,淀粉热稳定性越低,耐剪切性弱<sup>[30]</sup>。其中“宁梗 41 号”具有较大的崩解值,表现出较差的热稳定性和耐剪切性;“天降优 169”崩解值最低为 152  $\text{cPa}\cdot\text{s}$ ,说明淀粉结构发生改变,与水分子结合形成亲水胶体溶液,有较好的热稳定性和耐剪切性。回生值是指最终黏度和谷值黏度之间的差值,回生值越高,样品冷糊稳定性越低,凝胶性越强,越易老化<sup>[31]</sup>。“宁梗 41 号”“稻花香 4 号”和“宁香”的回生值较高,说



表 1 不同品种大米淀粉 RVA 的糊化参数  
Table 1 RVA pasting parameters of different rice starches

编号	样品名称	峰值黏度/cPa·s	谷值黏度/cPa·s	崩解值/cPa·s	最终黏度/cPa·s	回生值/cP
1	宁梗 55 号	974	612	362	1 360	748
2	宁梗 54 号	966	585	381	1 372	787
3	宁梗 28 号	1 009	621	388	1 398	777
4	宁梗 41 号	1 793	948	845	1 959	1 011
5	宁梗 48 号	692	518	174	1 160	642
6	宁梗 50 号	940	606	388	1 318	777
7	松辽 6 号	790	557	233	1 291	734
8	松辽 7 号	1 319	734	585	1 536	802
9	花 147	838	521	317	1 222	701
10	花 159	1 094	609	485	1 351	742
11	宁香	1 038	695	343	1 531	836
12	富源 4 号	1 203	708	495	1 482	774
13	天降优 169	666	514	152	153	639
14	稻花香 4 号	1 233	664	569	1 598	934
15	水稻 3	976	626	350	1 378	752
16	水稻 D10	967	598	369	1 332	734
17	5 关 19	944	616	328	1 539	743
18	香优 108	1 099	649	450	1 435	786
19	843	665	482	183	1 190	708
20	177J-13	1 049	638	411	1 417	779
21	18HJ-24	920	589	331	1 276	687

明这 3 个大米淀粉更易老化，老化后氢键数量增多,凝胶强度增加。

### 3 结 语

21 种不同宁夏稻区品种的大米淀粉,分子结构相同,均为 A 型。结晶度差异较大,结晶度最高是“宁梗 28 号”,最低是“稻花香 4 号”和“花 147”。由红外光谱分析可知,不同品种的大米淀粉分子均在 2 930 cm<sup>-1</sup> 产生吸收峰,其中,“水稻 3”在 1 748 cm<sup>-1</sup>

和 2 852 cm<sup>-1</sup> 产生特征吸收峰,说明不同品种之间分子有序性存在差异。在糊化曲线分析中,不同品种的大米淀粉 RVA 曲线变化相同,其中“宁梗 41 号”黏滞性较强,“843”较差。“天降优 169”表现出较好的热稳定性和耐剪切性,而“宁梗 41 号”与之相反。“宁梗 41 号”“稻花香 4 号”“宁香”的回生值较高,适合制备所需凝胶性强的食品。以上研究结果可为宁夏不同大米品种的分类及精细加工提供参考依据。

### 参考文献:

[ 1 ] GOVINDARAJU I,ZHUO G Y,CHAKRABORTY I,et al. Investigation of structural and physico-chemical properties of rice starch with varied amylose content:a combined microscopy,spectroscopy,and thermal study[J]. **Food Hydrocolloids**,2022, 122:107093.

[ 2 ] BIAN J L,REN G L,XU F F,et al. Comparison of grain yield and quality of different types of *Japonica* rice cultivars in the northern Jiangsu plain,China[J]. **Journal of Integrative Agriculture**,2021,20(8):2065-2076.

[ 3 ] 谯银强,王尧,陈江平,等. 高能球磨对大米淀粉物化特性和结构的影响[J]. 食品科学,2020,41(13):89-95.

HUO Y Q,WANG Y,CHEN J P,et al. Effects of high energy ball milling on physicochemical properties and structure of rice starch[J]. **Food Science**,2020,41(13):89-95. (in Chinese)

[ 4 ] LI C,GONG B. Relations between rice starch fine molecular and lamellar/crystalline structures[J]. **Food Chemistry**,2021,353:

- 129467.
- [5] YANG K, LUO X H, ZHAI Y H, et al. Influence of sodium alginate on the gelatinization, rheological, and retrogradation properties of rice starch[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2021, 185: 708-715.
- [6] 陈龙, 王谊, 程昊, 等. 水相高温处理对淀粉结构与性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(11): 1-11.  
CHEN L, WANG Y, CHENG H, et al. Effect of high temperature treatments of aqueous phase on structure and properties of starch[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2021, 40(11): 1-11. (in Chinese)
- [7] 刘亚超, 李永玉, 彭彦昆, 等. 近红外漫透射光补偿法无损快速检测大米直链淀粉[J]. 分析化学, 2019, 47(5): 785-793.  
LIU Y C, LI Y Y, PENG Y K, et al. Non-destructive rapid detection of rice amylose content by near-infrared diffuse transmission optical compensation method[J]. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, 2019, 47(5): 785-793. (in Chinese)
- [8] 罗舜菁, 李燕, 杨榕, 等. 氨基酸对大米淀粉糊化和流变性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 178-182.  
LUO S J, LI Y, YANG R, et al. Effects of amino acids on pasting and rheological properties of rice starch[J]. **Food Science**, 2017, 38(15): 178-182. (in Chinese)
- [9] 周林秀, 丁长河. 大米淀粉的提取及其在食品工业中的应用[J]. 农产品加工学刊, 2012(11): 191-193.  
ZHOU L X, DING C H. The extraction of rice starch and its application in food industries[J]. **Academic Periodical of Farm Products Processing**, 2012(11): 191-193. (in Chinese)
- [10] 周梦露, 钱晓洁, 孙冰华, 等. 蛋白质及其水解物对谷物淀粉糊化、回生及消化性的影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(2): 180-187.  
ZHOU M L, QIAN X J, SUN B H, et al. Effect of protein and its hydrolysates on gelatinization, retrogradation and digestibility of cereal starch[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2022, 37(2): 180-187. (in Chinese)
- [11] HAN Z, LI Y, LUO D H, et al. Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment[J]. **Food Chemistry**, 2021, 359: 129887.
- [12] 刘传菊, 李欢欢, 汤尚文, 等. 大米淀粉结构与特性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(12): 107-114.  
LIU C J, LI H H, TANG S W, et al. A review on structures and properties of rice starches[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2019, 34(12): 107-114. (in Chinese)
- [13] 程科. 大米淀粉物化特性、分子结构及其相关性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006: 6-8.
- [14] 马洪文, 谢万奇, 殷延勃, 等. 近红外光谱分析技术及其在稻米品质改良中的应用[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(8): 1-2.  
MA H W, XIE W Q, YIN Y B, et al. Near infrared spectral analysis technology and its application in rice quality improvement[J]. **Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology**, 2011, 52(8): 1-2. (in Chinese)
- [15] 唐雅璐, 全珂, 刘艳兰, 等. 大米淀粉三种提取方法的对比研究[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(4): 32-38.  
TANG Y L, QUAN K, LIU Y L, et al. Compared among three extraction methods on rice starch[J]. **Cereal & Food Industry**, 2020, 27(4): 32-38. (in Chinese)
- [16] 吴丽荣, 叶兴乾, 田金虎, 等. 超声辅助复合酶法制备碎米多孔淀粉及结构比较[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 120-126.  
WU L R, YE X Q, TIAN J H, et al. Preparation of porous broken rice starch by ultrasound assisted composite enzymatic method and comparison of their properties[J]. **Journal of the Chinese Cereals and Oils Association**, 2020, 35(6): 120-126. (in Chinese)
- [17] 大米及米粉糊化特性测定. 快速黏度仪法: AASHTO T 339-2010(R2019)[S].
- [18] JIN Q Q, XU X J. Microstructure, gelatinization and pasting properties of rice starch under acid and heat treatments[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2020, 149: 1098-1108.
- [19] 蔡沙, 何建军, 徐瑾, 等. 不同类型大米淀粉物化特性的研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(22): 5897-5902.  
CAI S, HE J J, XU J, et al. Study on the physicochemical properties from different types of rice starches[J]. **Hubei Agricultural Sciences**, 2016, 55(22): 5897-5902. (in Chinese)
- [20] 李玥, 钟芳, 麻建国, 等. 大米淀粉糊化过程的光谱分析[J]. 高分子学报, 2008(7): 720-725.  
LI Y, ZHONG F, MA J H, et al. Spectra analysis on rice starches from different varieties during pasting[J]. **Acta Polymerica Sinica**, 2008(7): 720-725. (in Chinese)
- [21] HUANG S Q, CHAO C, YU J L, et al. New insight into starch retrogradation; the effect of short-range molecular order in gelatinized starch[J]. **Food Hydrocolloids**, 2021, 120: 106921.
- [22] BISINELLA R Z B, BENINCA C, BET C D, et al. Thermal, structural and morphological characterisation of organic rice starch

- after physical treatment[J]. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2022, 147(5):3615-3623.
- [23] 褚艳红, 庄玉伟, 郭辉, 等. 马铃薯淀粉加工成型前后红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(S1):35-36.  
CHU Y H, ZHUANG Y W, GUO H, et al. Study on the FTIR spectrum of potato starch before and after molding[J]. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, 2020, 40(S1):35-36. (in Chinese)
- [24] HAN Z, LI Y, LUO D H, et al. Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment[J]. **Food Chemistry**, 2021, 359:129887.
- [25] 陈玲, 赵月, 张攀峰, 等. 不同品种马铃薯淀粉的结构[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(1):133-138.  
CHEN L, ZHAO Y, ZHANG P F, et al. Structure of potato starches with different varieties [J]. **Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)**, 2013, 41(1):133-138. (in Chinese)
- [26] 高群玉, 叶营, 王琳. 湿热处理对不同晶型淀粉理化性质及消化性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(3):60-65.  
GAO Q Y, YE Y, WANG L. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical properties and digestibility of starches with different crystal structures[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2015, 31(3):60-65. (in Chinese)
- [27] 施杨琪, 黄茜蕊, 茹炜崇, 等. 14 种不同马铃薯全粉的理化特性差异分析[J]. 核农学报, 2021, 35(7):1593-1600.  
SHI Y Q, HUANG X R, RU W D, et al. Difference analysis of the physicochemical properties of wholemeal flour from 14 potato varieties[J]. **Journal of Nuclear Agricultural Sciences**, 2021, 35(7):1593-1600. (in Chinese)
- [28] 朱玲. 基于结构剖析和实时监测研究大米食味品质的影响机制[D]. 无锡: 江南大学, 2020:30-32.
- [29] 毛海锋, 吴卫国, 肖华西. 大米淀粉的糊化特性研究[J]. 广西轻工业, 2009, 25(3):8-9.  
MAO H F, WU W H, XIAO H X. Study on gelatinization characteristics of rice starch[J]. **Guangxi Journal of Light Industry**, 2009, 25(3):8-9. (in Chinese)
- [30] 柳艳梅, 左小博, 房升, 等. 亲水性胶体对大米淀粉流变与回生性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(1):47-52.  
LIU Y M, ZUO X B, FANG S, et al. Effect of hydrocolloids on the rheology and retrogradation of rice starch[J]. **Food Science**, 2017, 38(1):47-52. (in Chinese)
- [31] 刘成梅, 徐梦涵, 钟业俊, 等. 陈化进程中大米淀粉与谷蛋白的相互作用[J]. 食品工业科技, 2016, 37(2):156-159.  
LIU C M, XU M H, ZHONG Y J, et al. Interaction between rice starch and glutelin during aging[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2016, 37(2):156-159. (in Chinese)