

陈化前后大米的淀粉结构及理化性质分析

卢紫君, 赵时珊, 蔡芳, 蔡沙, 隋勇, 施建斌, 熊添, 何建军, 陈学玲, 范传会, 家志文, 梅新*

(湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 对比分析陈化前后 6 个不同品种大米淀粉结构与理化性质, 结果表明, 不同品种大米淀粉的直链淀粉含量、体积平均粒径 ($D_{[4,3]}$)、结晶度及糊化起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、终止温度 (T_c)、热焓 (ΔH) 分别介于 17.24%~22.69%、5.74~7.09 μm 、16.45%~18.19%、64.77~73.03 $^\circ\text{C}$ 、71.73~81.13 $^\circ\text{C}$ 、77.17~87.40 $^\circ\text{C}$ 、12.62~18.44 J/g 之间, 陈化后大米淀粉的直链淀粉含量显著 ($p<0.05$) 上升, 结晶度显著下降, 陈化对淀粉晶型及短程有序性无明显影响; 陈化对回生前后大米淀粉糊化特性均有明显影响, 大米淀粉经回生处理后, T_0 、 T_p 、 T_c 及 ΔH 明显下降; 随着温度升高, 大米淀粉溶解度与膨胀度明显上升, 陈化降低了大米淀粉膨胀度、溶解度和透光率。大米淀粉的直链淀粉含量与其 T_0 、 T_0' (回生淀粉 T_0) 正相关; 大米淀粉的 $D_{[4,3]}$ 与其 T_0 、 T_0' 、透光率正相关; 大米淀粉结晶度与其 T_0 、 ΔH 、 $\Delta H'$ (回生淀粉 ΔH) 正相关。该研究结果可为湖北稻米资源合理利用、陈米资源高效利用及产品开发提供理论依据。

关键词: 大米陈化; 淀粉; 粒径; X-衍射; 红外光谱; 理化特性

文章篇号: 1673-9078(2022)06-126-135

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.6.0715

Analysis of the Structure and Physicochemical Properties of Rice Starch before and after Aging

LU Zijun, ZHAO Shishan, CAI Fang, CAI Sha, SUI Yong, SHI Jianbin, XIONG Tian, HE Jianjun, CHEN Xueling, FAN Chuanhui, JIA Zhiwen, MEI Xin*

(Institute of Agro-Product Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan 430064, China)

Abstract: The structure and physicochemical properties of six different varieties of rice starch before and after aging were compared and analyzed. The results showed that the amylose content, volume mean diameter ($D_{[4,3]}$), crystallinity, gelatinization on set temperature (T_0), peak temperature (T_p), conclusion/end set temperature (T_c) and gelatinisation enthalpy (ΔH) of different varieties of rice starch were in the ranges of 17.24%~22.69%, 5.74~7.09 μm , 16.45%~18.19%, 64.77~73.03 $^\circ\text{C}$, 71.73~81.13 $^\circ\text{C}$, 77.17~87.40 $^\circ\text{C}$, and 12.62~18.44 J/g, respectively. After aging of rice starch, the amylose content significantly increased ($p<0.05$), and crystallinity significantly decreased, with the aging having no significant effect on the starch crystal form and short-range order. Aging had significant effects on the gelatinization characteristics of rice starch before and after retrogradation, and the T_0 , T_p , T_c and ΔH values of rice starch decreased significantly after retrogradation. With the increase of temperature, the solubility and swelling degree of rice starch increased significantly. Aging decreased the swelling degree, solubility and light transmittance of rice starch. The amylose content of rice starch was positively correlated with T_0 and T_0' (T_0 of retrograded starch), $D_{[4,3]}$ of rice starch was positively correlated with T_0 , T_0' and light transmittance, and the crystallinity of rice starch was positively correlated with T_0 , ΔH and $\Delta H'$ (ΔH of retrograded starch). The results of this research can provide a theoretical basis for rational utilization of rice resources in Hubei, and efficient utilization of old/aged rice resources and product development.

引文格式:

卢紫君,赵时珊,蔡芳,等.陈化前后大米的淀粉结构及理化性质分析[J].现代食品科技,2022,38(6):126-135,+8

LU Zijun, ZHAO Shishan, CAI Fang, et al. Analysis of the structure and physicochemical properties of rice starch before and after aging [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(6): 126-135, +8

收稿日期: 2021-07-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0301306)

作者简介: 卢紫君 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工与副产物综合利用, E-mail: 601754259@qq.com

通讯作者: 梅新 (1978-), 男, 博士研究生, 研究员, 研究方向: 粮食加工与副产物综合利用, E-mail: meixin0898@163.com

Key words: rice aging; starch; particle size; X-diffraction; infrared spectrum; physicochemical properties

我国是世界上最主要的稻谷生产国和消费国,据FAO统计,2019年,我国稻米产量 2.11×10^8 t,占世界总产量的27.98%。陈化是大米在储藏过程中发生的一系列物理和化学性质的变化,从而造成大米蒸煮、食用品质发生改变。目前,尚未发现其他谷物表现出与大米相似的陈化现象,且大米陈化贯穿其整个储藏过程^[1]。相对于新米而言,陈化后的大米食用品质明显下降,米饭出现粘性降低、缺乏光泽、香味丧失、口感变差等问题^[2]。前人研究表明,大米陈化与其淀粉、蛋白质、脂肪及酶活均有相关性,但确切的陈化机制尚未完全阐明,现有陈化理论均试图建立大米在陈化时发生的化学变化和品质特性变化之间的关系^[3,4]。

淀粉是大米的主要组成成分,约占其干重75%~85%,与其他作物淀粉一样,大米淀粉是线性直链淀粉和高度分支支链淀粉的高聚混合物。在淀粉颗粒中,直链淀粉和支链淀粉被组装成半晶体结构^[5]。淀粉的结构、理化性质与其食用品质密切相关,淀粉的分子结构与结晶度不同导致淀粉的溶胀、糊化、回生速率以及消化特性差异,进而影响其加工品质^[6];直链淀粉与大米的吸水率、体积膨胀率以及米饭的粘性、硬度、蓬松度等蒸煮特性直接相关,是决定大米加工特性与食味性的一个重要指标^[7,8]。在前人研究中,有关陈化对大米淀粉特性影响的研究,主要集中于陈化对大米淀粉的直链淀粉含量^[9-11]、长程与短程晶体结构^[8,12]、支链淀粉链长及分布^[2,13]、糊化特性^[4,14,15]等的影响。本研究在前人研究基础上,选取湖北省种植面积较广的几个稻谷品种,模拟高温高湿条件对大米进行加速陈化处理,比较分析了陈化前后不同品种大米淀粉的直链淀粉含量、结构及理化特性变化规律,以期对湖北稻米资源合理化利用及精深加工提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

由湖北省农业科学院粮食作物研究所提供2020年收获的荃两优丝苗、福稻88、晶两优丝苗、虾稻1号、隆两优534和黄华占等6个品种稻谷,精碾后得新鲜未陈化大米。参照周显青等^[16]方法,模拟高温高湿条件对新鲜大米(含水量介于12%~13%之间)进行快速陈化处理,新鲜大米分装于纱布袋置于恒温恒湿箱(40℃、RH 80%)中进行贮藏,28 d后取样得陈

化大米。

溴化钾(光谱纯),购自上海麦克林生化科技有限公司;氢氧化钠(分析纯),购自国药集团化学试剂有限公司;直链淀粉/支链淀粉含量检测试剂盒,购自爱尔兰Megazyme公司。

1.2 主要仪器设备

砵谷机、碾米机、QJ-08 400 g多功能粉碎机,上海赵申科技有限公司;722N可见分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;QUANTA 200扫描式电子显微镜,FEI公司;Empyrean X-射线衍射仪,荷兰PANalytical公司;VERTEX 70红外光谱仪,德国Bruker公司;Mastersizer 2000激光粒度仪,英国Malvern仪器有限公司;DSC-200差示扫描量热仪,德国NETZSCH公司;湘仪GL-21M离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;HHS-21-6水浴锅,上海百典仪器设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 淀粉提取及直链淀粉含量测定

参照Yang等^[17]的方法提取大米淀粉。取100 g大米浸泡于300 mL去离子水中于4℃下浸泡24 h后,经胶体磨粉碎过200目筛得浆液于4℃下放置24 h,收集沉淀并与500 mL 0.4% NaOH溶液充分混合,于4℃下放置48 h,沉淀与500 mL去离子水混合,以HCl调节pH至中性,收集沉淀用去离子水洗涤3次后于40℃下干燥,粉碎过200目筛,备用。

直链淀粉含量采用MEGAZYME直链淀粉/支链淀粉含量检测试剂盒测定。淀粉样品经二甲基亚砷溶解后,乙醇沉淀除去杂质,收集沉淀,沉淀用醋酸钠缓冲液溶解后,加入伴刀豆球蛋白,沉淀支链淀粉,离心去沉淀,上清液中直链淀粉酶解测定葡萄糖含量,依据葡萄糖含量计算直链淀粉含量。

1.3.2 淀粉颗粒显微观察及粒径测定

大米淀粉样品经粘台、喷金等步骤后,采用扫描电镜在加速电压5 kV下观察淀粉显微形态。以水为分散相,采用激光粒度仪测定大米淀粉粒径,大米淀粉粒径以体积平均粒径 $D_{[4,3]}$ 表示。

1.3.3 淀粉X-射线衍射及红外光谱分析

采用Empyrean X-射线衍射仪分析大米淀粉晶体结构。X射线衍射条件为:Cu-K α 辐射,操作电压40 kV,电流40 mA,步宽角度0.013°,收集在5~45°范围的衍射数据,得到X-衍射图谱,依据结晶区面积

与总面积比计算结晶度。称取 1 mg 淀粉干基与 100 mg 溴化钾粉末, 充分研磨混合后压片, 采用红外光谱仪于 400~4000 cm^{-1} 波数范围内扫描。

1.3.4 淀粉糊化特性分析

淀粉热力学特性分析参照 Patindol 等^[4]和项晓月等^[8]的方法。称取 3±0.1 mg (干基) 淀粉至铝坩埚中, 后加入 10 μL 去离子水, 加盖密封, 于室温下平衡 2 h 后采用 DSC 分析其糊化特性, 空坩埚作为参比。按 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率将坩埚从 30 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 120 $^{\circ}\text{C}$, 氮气流量 20 mL/min , 根据吸热曲线分析计算得糊化起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、终止温度 (T_c) 及糊化焓 (ΔH); 取上述淀粉配置浓度为 5% (m/V) (干基) 淀粉乳, 沸水浴糊化 30 min 后, 水浴降温至 45 $^{\circ}\text{C}$ 后, 保温搅拌 10 min, 于 4 $^{\circ}\text{C}$ 下回生 7 d 后, 40 $^{\circ}\text{C}$ 下热风干燥, 粉碎过 200 目筛, 得回生淀粉。取 3±0.1 mg (干基) 回生淀粉至坩埚中, 按 1:2 (g/mL) 加入去离子水, 加盖密封, 按上述方法测定回生淀粉糊化特性^[18], T_0' 、 T_p' 、 T_c' 、 $\Delta H'$ 分别表示回生淀粉的糊化起始温度、峰值温度、终止温度、糊化焓。

1.3.5 淀粉溶解度及膨胀度测定

参照 Wang 等^[19]的方法, 测定不同温度下大米淀粉溶解度与膨胀度。取一定量大米淀粉 (记为 m) 配成浓度为 2% (m/V) (干基) 的淀粉乳, 分别置于 55、65、75、85、95 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴搅拌加热 30 min, 后于 3000 r/min 离心 20 min, 上清液置于称量瓶中 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 记为 m_1 , 沉淀重量记为 m_2 , 溶解度 (%) 和膨胀度 (g/g) 计算公式如下:

$$\text{溶解度}/\% = \frac{m_1}{m} \times 100\%$$

$$\text{膨胀力}/(\text{g}/\text{g}) = \frac{m_2}{m - m_1}$$

1.3.6 淀粉透光率测定

配置浓度为 1% (m/V) (干基) 的大米淀粉乳, 并置于沸水浴中搅拌加热 30 min, 至完全糊化, 此过程中保持淀粉糊体积不变, 加热结束后, 冷却至室温, 以蒸馏水做空白 (透光率 100%), 于 650 nm 下测定

淀粉糊透光率^[20]。

1.3.7 数据及相关性分析

在前期基础上, 分析大米淀粉中直链淀粉含量、粒径、结晶度与其理化指标的相关性。采用 Excel 2016 和 SPSS 22 对数据进行处理及相关性分析, Origin 9.1 绘图, 差异显著性采用 Duncan 单因素方差分析, 结果以平均值±标准差表示, 小写字母不同表示相同陈化度不同品种间存显著性差异 ($p < 0.05$), 大写字母不同表示相同品种不同陈化度间存显著性差异 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 陈化前后不同品种大米淀粉的直链淀粉含量

从表 1 可以看出, 未陈化 6 个品种大米淀粉的直链淀粉含量介于 17.24%~22.69% 之间, 虾稻 1 号淀粉中直链淀粉含量最高, 隆两优 534 淀粉中直链淀粉含量最低; 相比未陈化大米淀粉, 陈化后 6 个品种大米淀粉的直链淀粉含量均显著 ($p < 0.05$) 上升, 其含量介于 25.05%~33.49% 之间, 晶两优丝苗淀粉中直链淀粉含量最高, 荃两优丝苗淀粉中直链淀粉含量最低。陈化后, 晶两优丝苗淀粉的直链淀粉含量上升幅度最大, 达 12.99%, 福稻 88 淀粉的直链淀粉含量上升幅度最小, 仅 6.85%。王帅^[10]研究表明, 随着粳米贮藏时间延长, 直链淀粉含量上升, 且上升幅度与贮藏时间成正比。有关储藏过程中大米中直链淀粉变化规律, 前人研究结果说法不一。邱明成等^[9]和罗曜等^[21]发现, 大米陈化贮藏过程中, 直链淀粉含量升高, 并认为是内源酶的作用导致部分支链淀粉水解成直链淀粉; 然而, 陈业坚等^[11]对比了 11 个品种新陈大米品质, 结果表明, 陈化前后大米直链淀粉含量基本保持稳定。Huang 等^[13]发现, 稻米高温储藏陈化过程中, 内源 α -淀粉酶降解了支链淀粉长链, 形成了部分短链, 酶解程度与酶活、储藏条件、稻米品种、储藏时间等因素相关。

表 1 不同品种大米淀粉直链淀粉含量 (%)

Table 1 Amylose content of rice starch from different varieties (%)

项目	荃两优丝苗	福稻 88	晶两优丝苗	虾稻 1 号	隆两优 534	黄华占
未陈化	17.49±0.77 ^{cB}	22.66±0.75 ^{aB}	20.50±0.91 ^{bB}	22.69±1.23 ^{aB}	17.24±0.73 ^{cB}	19.73±0.76 ^{bB}
陈化	25.05±2.60 ^{cA}	29.51±0.81 ^{bA}	33.49±1.43 ^{aA}	30.24±2.08 ^{abA}	27.40±0.81 ^{bcA}	30.46±0.82 ^{abA}

2.2 陈化前后不同品种大米淀粉显微形态及

粒径

图 1 为 8000 倍下陈化前后不同品种大米淀粉扫描电镜图, 从图中可以看出, 大米淀粉颗粒外形不规则, 多数呈现多角多边形, 边缘清晰, 表面粗糙, 少数存在凹陷, 颗粒大小不均一; 其中虾稻 1 号淀粉颗粒表

面有细小孔隙；陈化前后大米淀粉颗粒形态无明显变化。王怡杰等^[12]研究结果也表明，随着储藏（35℃，

RH 75%）时间延长，大米淀粉颗粒形态未发生明显变化。

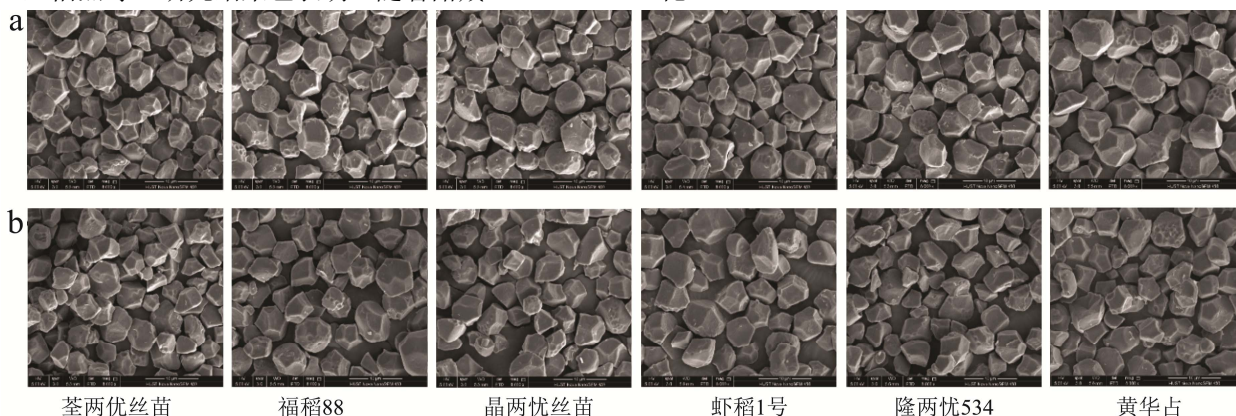


图1 不同品种大米淀粉扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrograph of rice starch from different varieties

注：a：未陈化；b：陈化。

表2 不同品种大米淀粉体积平均粒径（μm）

Table 2 Mean Volume particle size of rice starch from different varieties (μm)

项目	荃两优丝苗	福稻88	晶两优丝苗	虾稻1号	隆两优534	黄华占
未陈化	5.74±0.09 ^{cB}	6.43±0.22 ^{bA}	5.88±0.11 ^{cB}	6.54±0.15 ^{bA}	6.58±0.40 ^{bA}	7.09±0.12 ^{aA}
陈化	6.17±0.06 ^{aA}	6.57±0.09 ^{aA}	6.55±0.16 ^{aA}	6.57±0.07 ^{aA}	6.63±0.04 ^{aA}	6.53±0.09 ^{aB}

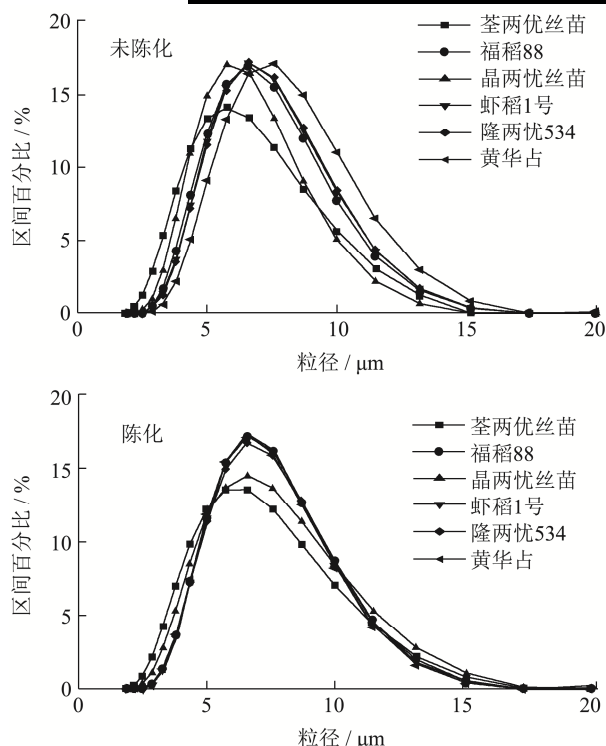


图2 不同品种大米粒径分布情况

Fig.2 Particle size distribution of rice starch from different varieties

陈化前后不同品种大米淀粉粒径分布情况以及其 $D_{[4,3]}$ 分别如图2、表2所示，对照图2、表2可以看出，陈化前后不同品种大米淀粉粒径均介于 1.905~19.953 μm 之间，且超过 40%淀粉颗粒粒径介于 5.012~7.586

μm 之间。陈化前，不同品种大米淀粉 $D_{[4,3]}$ 介于 5.74~7.09 μm 之间，其中黄华占淀粉 $D_{[4,3]}$ 最大，而荃两优丝苗淀粉 $D_{[4,3]}$ 最小；陈化后，除黄华占淀粉 $D_{[4,3]}$ 下降外，其他各品种淀粉 $D_{[4,3]}$ 均有不同程度上升，不同品种大米淀粉 $D_{[4,3]}$ 介于 6.17~6.63 μm 之间，虾稻1号淀粉 $D_{[4,3]}$ 最大，荃两优丝苗淀粉 $D_{[4,3]}$ 最小。项晓月研究发现，加温加湿加速陈化处理可显著 ($p < 0.05$) 提高大米淀粉粒径^[8]。王怡杰等^[12]研究表明，储藏时间对大米淀粉粒径有影响，但无显著差异。董鹏等^[22]研究发现，大米中清蛋白抑制大米中淀粉颗粒间解聚，脂肪则促进淀粉颗粒间解聚，陈化处理明显增大清蛋白、脂肪对于淀粉颗粒间解聚的影响。淀粉粒径不同，其直链淀粉、支链淀粉分子结构必然不同^[23]，陈化后大米淀粉粒径可能与陈化过程中直链淀粉与支链淀粉分子结构变化有关。

2.3 陈化前后不同品种大米淀粉 X-射线衍射

淀粉颗粒是由直链淀粉或支链淀粉分子径向排列而成，具有结晶区与非结晶区交替层叠结构。支链淀粉以螺旋结构形式存在的成簇分支堆积在一起形成许多小的结晶区，主要有 A、B、C 型 3 种晶体类型。陈化前后不同品种大米淀粉 X-射线衍射如图3所示，从图中可以看出，陈化前后所有大米淀粉在 15°、17°、18°、23° 附近有明显的衍射峰，呈典型的 A 型淀粉结晶特征^[24]，陈化处理未改变大米淀粉晶体类型。此外，

大米淀粉经湿热以及不同水分含量与温度下微波处理后,晶型亦并未发生改变^[25,26]。

陈化导致大米淀粉结晶度(表3)下降。陈化前,不同品种大米淀粉结晶度介于16.75%~19.11%之间,隆两优534淀粉结晶度显著($p<0.05$)高于其他几个品种,荃两优丝苗淀粉结晶度最低;陈化后,不同品种大米淀粉结晶度介于16.45%~18.19%之间,晶两优丝苗淀粉结晶度最高,荃两优丝苗淀粉结晶度最低,隆两优534淀粉结晶度降幅最大,达1.12%。刘成梅等^[27]研究表明,韧化处理(45±1℃,RH 80%±2%)1d后,大米淀粉结晶度显著降低,延长处理时间,结晶度降幅减小。陈化及高温高湿的环境下,大米淀粉双螺旋结构裂解,淀粉分子链的有序排列被破坏,导致结晶度下降^[12,28]。

表3 不同品种大米淀粉结晶度(%)

Table 3 Crystallinity of rice starch from different varieties (%)

项目	荃两优丝苗	福稻88	晶两优丝苗	虾稻1号	隆两优534	黄华占
未陈化	16.75±0.28 ^{cA}	17.15±0.19 ^{cA}	18.66±0.16 ^{abA}	17.23±0.14 ^{cA}	19.11±0.59 ^{aA}	18.24±0.21 ^{bA}
陈化	16.45±0.50 ^{cA}	16.74±0.30 ^{bA}	18.19±0.15 ^{ab}	17.08±0.11 ^{bA}	17.99±0.14 ^{ab}	17.77±0.42 ^{aA}

2.4 陈化前后不同品种大米淀粉红外光谱分析

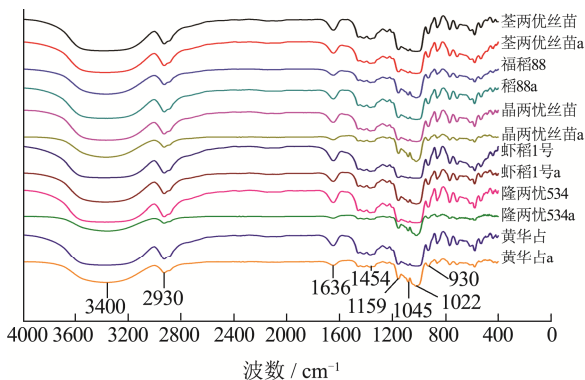


图4 不同品种大米淀粉红外光谱图

Fig.4 FT-IR graph of rice starch from different varieties

注: 加后缀 a 为陈化后大米淀粉。

从图3中可以看出,陈化前后不同品种大米淀粉均具有相似的特征吸收峰,表明陈化前后大米淀粉的有序结构无明显变化。红外光谱中1045 cm⁻¹附近吸收峰是结晶区的结构特征,对应淀粉分子中有序结构;1022 cm⁻¹附近吸收峰是无定型区的结构特性,对应淀粉分子中无规则的线团结构,两者的比值可以反应淀粉分子的短程有序性,比值越大,短程有序性越高^[12]。此外,红外光谱中930 cm⁻¹附近的吸收峰对应于α-1,4糖苷键(C-O-C)的骨架振动;1159 cm⁻¹附近的吸收峰为对应于C-O以及C-C的伸缩振动;1454 cm⁻¹附近微弱的吸收峰对应于CH₂的弯曲振动;1636 cm⁻¹附近为碳水化合物体系中(COO⁻)伸缩振动吸收峰;

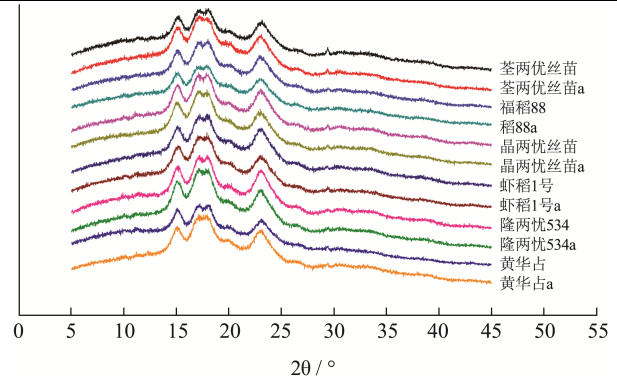


图3 不同品种大米淀粉X-射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction graph of rice starch from different varieties

注: 加后缀 a 为陈化后大米淀粉。

2930 cm⁻¹附近吸收峰对应于CH₂的反对称伸缩振动;3400 cm⁻¹附近一个极强且宽的吸收峰对应于O-H键伸缩振动^[26,29]。

2.5 陈化前后不同品种大米淀粉糊化特性

大米淀粉糊化特性与其直链淀粉含量、结晶度、支链淀粉结构及分子量分布、粒径分布密切相关^[30]。小颗粒淀粉内部结构紧密,糊化温度比大颗粒高;直链淀粉能抑制淀粉颗粒的紧密结构在加热糊化过程中被破坏^[31];此外,ΔH是淀粉糊化过程中颗粒分子顺序损失的指标,与分子内结晶度密切相关^[14]。从表4中可以看出,陈化前,不同品种大米淀粉T₀、T_p、T_c、ΔH分别介于64.77~73.03℃、71.73~81.13℃、77.17~87.40℃、12.62~18.44 J/g之间,隆两优534淀粉的T₀、T_p、T_c、ΔH均显著($p<0.05$)高于其他品种,荃两优丝苗淀粉的T₀最低,虾稻1号淀粉的T_p及T_c最低,黄华占淀粉的ΔH最低;陈化后,福稻88及隆两优534淀粉的ΔH显著下降,其他各品种亦有小幅下降,荃两优丝苗及黄华占淀粉的T₀、T_p、T_c均有小幅上升,不同品种大米淀粉T₀、T_p、T_c及ΔH分别介于65.40~73.37℃、71.40~80.67℃、77.33~86.47℃、11.97~15.63 J/g之间,隆两优534淀粉的T₀、T_p、T_c、ΔH均显著高于其他品种,荃两优丝苗淀粉的T₀最低,福稻88淀粉的T_p、T_c最低,虾稻1号淀粉的ΔH最低。在前人报道中,储藏对于大米淀粉糊化特性指标的影响结果不一,项晓月研究发现,加温加湿加速陈

化处理可提高大米淀粉 T_0 、 ΔH ，降低 T_c - T_0 值^[8]；顾芳婷^[14]研究发现，随着储藏陈化时间延长，其淀粉 T_0 、

T_p 、 T_c 、 ΔH 降低；而 Ramarathnam 等^[32]研究表明，储藏时间对于大米淀粉糊化温度无明显影响。

表 4 不同品种大米淀粉糊化特性

Table 4 Gelatinization properties of rice starch from different varieties

大米淀粉		$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
荃两优丝苗	未陈化	64.77±0.15 ^{dB}	72.10±0.20 ^{cA}	78.13±0.38 ^{cA}	12.79±1.25 ^{bA}
	陈化	65.40±0.30 ^{eA}	72.20±0.17 ^{cA}	78.40±0.35 ^{cA}	12.56±0.80 ^{abA}
福稻 88	未陈化	66.43±0.15 ^{dA}	71.90±0.10 ^{cA}	77.67±0.15 ^{dA}	13.93±0.61 ^{bA}
	陈化	66.83±0.06 ^{dA}	71.40±0.36 ^{cA}	77.33±0.32 ^{dA}	12.63±0.41 ^{bB}
晶两优丝苗	未陈化	70.33±0.38 ^{bB}	79.33±0.25 ^{bA}	85.53±0.21 ^{bA}	17.28±3.86 ^{aA}
	陈化	71.63±0.40 ^{bA}	78.97±0.15 ^{bA}	84.93±0.06 ^{bB}	14.73±0.99 ^{aA}
虾稻 1 号	未陈化	66.40±0.10 ^{dB}	71.73±0.35 ^{cA}	77.17±0.29 ^{eB}	13.00±0.12 ^{bA}
	陈化	67.03±0.15 ^{dA}	71.83±0.38 ^{cA}	78.57±0.35 ^{cA}	11.97±1.04 ^{bA}
隆两优 534	未陈化	73.03±1.10 ^{aA}	81.13±0.15 ^{aA}	87.40±0.10 ^{aA}	18.44±0.66 ^{aA}
	陈化	73.37±0.55 ^{aA}	80.67±0.15 ^{ab}	86.47±0.15 ^{ab}	15.63±0.66 ^{ab}
黄华占	未陈化	67.20±0.00 ^{cA}	71.77±0.23 ^{cB}	77.60±0.26 ^{deA}	12.62±0.74 ^{bA}
	陈化	67.43±0.15 ^{cA}	72.57±0.25 ^{cA}	77.97±0.25 ^{deA}	12.22±1.22 ^{bA}

表 5 不同品种回生大米淀粉糊化特性

Table 5 Gelatinization properties of retrogradation rice starch from different varieties

大米淀粉		$T_0'/^\circ\text{C}$	$T_p'/^\circ\text{C}$	$T_c'/^\circ\text{C}$	$\Delta H' /(\text{J/g})$
荃两优丝苗	未陈化	42.77±3.88 ^{abA}	51.30±2.65 ^{bcA}	63.90±0.00 ^{aA}	1.59±0.14 ^{cdA}
	陈化	37.60±1.27 ^{cB}	52.10±4.67 ^{bA}	60.75±0.35 ^{cB}	1.51±0.48 ^{cA}
福稻 88	未陈化	45.10±1.84 ^{aA}	50.70±2.26 ^{bcB}	55.90±5.37 ^{bA}	0.76±0.15 ^{fA}
	陈化	47.60±3.11 ^{aA}	54.70±1.41 ^{abA}	60.35±1.06 ^{cA}	0.81±0.11 ^{eA}
晶两优丝苗	未陈化	39.17±0.91 ^{cB}	53.03±1.16 ^{abA}	63.50±1.04 ^{aA}	6.33±0.34 ^{aA}
	陈化	44.03±0.61 ^{bA}	54.43±2.22 ^{abA}	63.20±0.35 ^{bA}	4.38±0.13 ^{bB}
虾稻 1 号	未陈化	42.70±0.69 ^{abB}	49.40±1.45 ^{cB}	61.90±0.31 ^{aA}	2.69±0.12 ^{cA}
	陈化	45.70±0.56 ^{bA}	54.77±0.23 ^{abA}	60.97±0.21 ^{cB}	1.12±0.20 ^{deB}
隆两优 534	未陈化	41.57±0.97 ^{bcB}	55.43±0.58 ^{aA}	64.20±1.06 ^{aA}	5.94±0.19 ^{bA}
	陈化	44.63±0.35 ^{bA}	55.73±0.38 ^{aA}	64.57±0.40 ^{aA}	5.18±0.12 ^{abB}
黄华占	未陈化	44.37±0.70 ^{abB}	52.45±1.34 ^{bB}	55.55±1.20 ^{bB}	1.20±0.12 ^{eA}
	陈化	45.50±0.57 ^{bA}	56.20±1.84 ^{aA}	60.80±0.99 ^{cA}	1.18±0.50 ^{dA}

淀粉回生分为短期回生和长期回生，短期回生是指直链淀粉在凝胶化后开始无规则卷曲、短时间内不可逆重组形成晶核；长期回生是指支链淀粉凝胶化重聚产生晶体结构，并围绕附着在晶核上，缓慢生长，形成新的结晶^[33]。直链淀粉对淀粉回生起协同作用，直链淀粉含量高的大米淀粉回生程度高^[34]。从表 5 中可以看出，陈化前，不同品种回生大米淀粉的 T_0' 、 T_p' 、 T_c' 、 $\Delta H'$ 分别介于 39.17~45.10 $^\circ\text{C}$ 、49.40~55.43 $^\circ\text{C}$ 、55.55~64.20 $^\circ\text{C}$ 、0.76~6.33 J/g 之间，晶两优丝苗回生淀粉的 T_0' 最低，但 $\Delta H'$ 最高，隆两优 534 回生淀粉的 T_p' 、 T_c' 最高；陈化后，不同品种大米回生淀粉 T_0' 、 T_p' 、 T_c' 、 $\Delta H'$ 分别介于 37.60~47.60 $^\circ\text{C}$ 、52.10~56.20 $^\circ\text{C}$ 、60.35~64.57 $^\circ\text{C}$ 、

0.81~5.18 J/g 之间，荃两优丝苗回生淀粉的 T_0' 、 T_p' 最低，隆两优 534 回生淀粉的 T_c' 、 $\Delta H'$ 最高；陈化后晶两优丝苗、虾稻 1 号、隆两优 534 回生淀粉的 $\Delta H'$ 显著 ($p<0.05$) 下降，其他品种回生淀粉 $\Delta H'$ 无显著变化。

2.6 陈化前后不同品种大米淀粉溶解度与膨胀度

大米淀粉水溶性与淀粉的链长、分子量、粒径、直链淀粉含量以及结晶度等结构特性相关，85 $^\circ\text{C}$ 下天然大米淀粉溶解度低于 20%，热处理可明显提升大米淀粉溶解度^[35]。从表 6 中可以看出，温度高于 65 $^\circ\text{C}$

时,随着温度升高,所有大米淀粉溶解度均呈明显上升趋势;陈化前,不同品种大米淀粉在 55、65、75、85、95 °C 下溶解度分别介于 0.68%~1.03%、0.75%~1.12%、3.63%~6.01%、10.88%~16.17%、12.66%~14.76%之间,55 °C、95 °C 下,不同品种大米淀粉溶解度几乎无显著 ($p<0.05$) 差异,隆两优 534、晶两优丝苗淀粉的溶解度较高;陈化后,不同品种大米淀粉在 55、65、75、85、95 °C 下溶解度分别介于 0.42%~

0.59%、0.63%~0.86%、2.46%~5.13%、7.29%~11.02%、9.25%~13.28%之间,75 °C 下不同品种大米淀粉溶解度无显著差异,95 °C 下不同品种大米淀粉溶解度存显著性差异,黄华占、虾稻 1 号淀粉的溶解度较高;陈化后大米淀粉溶解度均有不同幅度下降,且绝大部分显著下降。陈化导致大米淀粉分子微晶束加强,淀粉颗粒吸水膨胀力不足以使淀粉分子发生结构破裂和相的转移,淀粉溶解度下降^[36]。

表 6 温度对不同品种大米淀粉溶解度影响 (%)

Table 6 Effect of temperature on solubility of rice starch from different varieties (%)

大米淀粉		55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
荃两优丝苗	未陈化	0.91±0.12 ^{abA}	1.12±0.10 ^{aA}	4.28±0.10 ^{cA}	11.38±1.24 ^{cdA}	12.67±1.28 ^{aA}
	陈化	0.59±0.04 ^{abB}	0.99±0.06 ^{aA}	3.27±0.09 ^{abB}	7.32±0.27 ^{cbB}	9.80±0.19 ^{deB}
福稻 88	未陈化	1.03±0.13 ^{aA}	0.97±0.15 ^{abA}	6.01±0.28 ^{aA}	13.50±0.34 ^{bA}	13.27±0.18 ^{aA}
	陈化	0.42±0.13 ^{bbB}	0.72±0.06 ^{bcB}	3.34±0.17 ^{abB}	7.29±0.16 ^{cbB}	11.62±0.43 ^{cbB}
晶两优丝苗	未陈化	0.84±0.03 ^{abA}	1.12±0.03 ^{aA}	3.82±0.23 ^{dA}	16.17±2.08 ^{aA}	14.76±0.27 ^{aA}
	陈化	0.53±0.06 ^{abB}	0.86±0.11 ^{abB}	2.49±0.12 ^{abB}	9.94±0.05 ^{bbB}	9.25±1.01 ^{cbB}
虾稻 1 号	未陈化	1.03±0.22 ^{aA}	0.90±0.18 ^{abA}	5.68±0.27 ^{aA}	12.97±0.27 ^{bcA}	14.76±0.15 ^{aA}
	陈化	0.58±0.04 ^{abB}	0.74±0.21 ^{bcA}	4.98±0.08 ^{abB}	10.16±0.80 ^{abB}	13.28±0.01 ^{abB}
隆两优 534	未陈化	0.97±0.07 ^{aA}	0.78±0.11 ^{bA}	3.63±0.04 ^{dA}	15.95±0.30 ^{aA}	12.66±3.77 ^{aA}
	陈化	0.58±0.06 ^{abB}	0.63±0.10 ^{ca}	2.46±0.06 ^{abB}	11.02±0.92 ^{abB}	10.35±2.11 ^{dA}
黄华占	未陈化	0.68±0.10 ^{ba}	0.75±0.05 ^{ba}	5.94±0.10 ^{ba}	10.88±0.26 ^{dA}	13.04±0.30 ^{aA}
	陈化	0.51±0.06 ^{abB}	0.73±0.09 ^{bcA}	5.13±0.17 ^{abB}	9.32±0.17 ^{bbB}	12.42±0.25 ^{bbB}

表 7 温度对不同品种大米淀粉膨胀度影响 (g/g)

Table 7 Effect of temperature on swelling index of rice starch from different varieties (g/g)

大米淀粉		55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	95 °C
荃两优丝苗	未陈化	2.41±0.01 ^{aA}	3.00±0.06 ^{ba}	10.98±0.22 ^{ca}	26.79±0.17 ^{da}	36.75±1.07 ^{ca}
	陈化	2.34±0.03 ^{abB}	2.95±0.03 ^{aA}	9.95±0.16 ^{db}	23.58±0.22 ^{cbB}	33.73±0.50 ^{bbB}
福稻 88	未陈化	2.34±0.01 ^{ba}	3.36±0.06 ^{aA}	13.72±0.56 ^{aA}	31.22±0.38 ^{ba}	33.15±0.58 ^{dA}
	陈化	2.28±0.05 ^{abA}	2.77±0.07 ^{bbB}	10.38±0.38 ^{cbB}	29.52±0.91 ^{ebB}	32.35±0.18 ^{bbB}
晶两优丝苗	未陈化	2.29±0.04 ^{bcA}	2.66±0.05 ^{dA}	6.32±0.11 ^{dA}	28.80±0.67 ^{ca}	39.08±1.03 ^{ba}
	陈化	2.30±0.05 ^{abA}	2.51±0.02 ^{cbB}	5.42±0.21 ^{ebB}	26.51±0.06 ^{bbB}	31.90±1.98 ^{bbB}
虾稻 1 号	未陈化	2.26±0.03 ^{ca}	2.88±0.08 ^{ca}	11.70±0.50 ^{ba}	26.09±0.63 ^{dA}	29.70±0.33 ^{ea}
	陈化	2.25±0.03 ^{bcA}	2.53±0.09 ^{cbB}	11.36±0.11 ^{ba}	22.35±0.44 ^{cdB}	28.41±0.34 ^{cbB}
隆两优 534	未陈化	2.34±0.01 ^{ba}	2.49±0.01 ^{ea}	6.75±0.07 ^{dA}	36.34±3.01 ^{aA}	45.92±1.39 ^{aA}
	陈化	2.31±0.03 ^{abA}	2.25±0.03 ^{dbB}	5.77±0.18 ^{ebB}	29.62±2.28 ^{abB}	41.37±2.59 ^{abB}
黄华占	未陈化	2.27±0.05 ^{ca}	2.73±0.08 ^{dA}	14.11±0.11 ^{aA}	26.35±0.44 ^{dA}	30.24±0.03 ^{ea}
	陈化	2.19±0.05 ^{ca}	2.75±0.00 ^{ba}	11.89±0.38 ^{abB}	21.61±0.51 ^{dbB}	26.16±0.34 ^{dbB}

从表 7 中可以看出,随着温度升高,大米淀粉膨胀度呈明显上升趋势;相同温度与陈化度下,不同品种大米淀粉膨胀度存显著性差异 ($p<0.05$),温度高于 85 °C 时,隆两优 534 淀粉膨胀度显著高于其他品种;陈化前,不同品种大米淀粉在 55、65、75、85、95 °C 下膨胀度分别介于 2.26~2.41 g/g、2.49~3.36 g/g、6.32~14.11 g/g、26.09~36.34 g/g、30.24~45.92 g/g 之间;

陈化后,不同品种大米淀粉在 55、65、75、85、95 °C 下膨胀度分别介于 2.19~2.34 g/g、2.25~2.95 g/g、5.42~11.89 g/g、21.61~29.62 g/g、26.16~41.37 g/g 之间。陈化导致大米淀粉膨胀度下降,这可能与陈化后大米淀粉中直链淀粉含量上升有关。相比于粒径,淀粉的膨胀度与其颗粒结构和化学组成关系更加密切,尤其是直链淀粉和脂肪含量^[23]。李玥^[31]和 Li 等^[37]研究发

现, 淀粉颗粒的胀润与直链淀粉含量有关, 直链淀粉能够抑制淀粉胀润。部分直链淀粉加热溶出后, 初始缠绕于淀粉颗粒表面, 维持支链淀粉双螺旋结构稳定性; 而未溶出直链淀粉在淀粉颗粒内部, 与支链淀粉分支结合形成稳固的淀粉半晶体结构, 抑制了淀粉颗粒的继续膨胀和受损。

2.7 陈化前后不同品种大米淀粉透光率

从图 5 可以看出, 陈化前, 不同品种大米淀粉透光率介于 8.57%~10.40%之间, 荃两优丝苗淀粉的透光率显著 ($p<0.05$) 低于其他品种, 黄华占淀粉的透光率显著高于其他品种; 陈化后大米淀粉透光率明显下降, 不同品种大米淀粉的透光率介于 8.40%~9.60%之间, 隆两优 534 淀粉的透光率最高, 荃两优丝苗淀粉的透光率最低。赵冰等^[20]研究表明, 随着大米淀粉中直链淀粉含量的增加, 透光率呈下降趋势。淀粉糊的透光率是一个重要感官指标, 与淀粉老化相关, 淀粉

老化后, 淀粉颗粒中直链淀粉通过氢键聚合, 减弱了光的穿透折射和反射, 导致透光率降低。

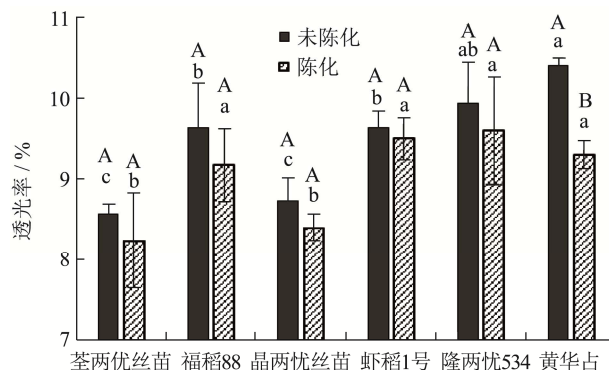


图 5 不同品种大米淀粉透光率

Fig.5 Transparency of rice starch from different varieties

2.8 陈化前后不同品种大米淀粉结构与物化

特性相关性分析

表 8 陈化前后不同品种大米淀粉结构与物化特性相关性

Table 8 Correlation of structure and physicochemical properties of aged and unaged rice starch

指标	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀
Y ₁ (未陈化)	0.352	-0.340	0.283	-0.316	-0.053	-0.340	0.145
Y ₁ (陈化)	0.311	0.095	0.608*	0.141	-0.372	0.041	-0.055
Y ₂ (未陈化)	0.132	-0.176	0.535*	-0.265	-0.188	0.076	0.990**
Y ₂ (陈化)	0.596*	0.355	0.909*	0.326	0.645*	0.394	0.741*
Y ₃ (未陈化)	0.936*	0.808*	-0.539*	0.777*	0.640*	0.571*	0.336
Y ₃ (陈化)	0.512*	0.320	0.334	0.408	0.553*	-0.148	-0.029

注: *, **分别表示显著与极显著相关; Y₁~Y₁₁依次代表指标为大米淀粉直链淀粉含量、粒径、结晶度、T₀、ΔH、T₀'、ΔH'、85 °C膨胀度、85 °C溶解度、透光率。

从表 8 中可以看出, 未陈化大米淀粉的直链淀粉含量与其 T₀、T₀' 呈正相关, 陈化后, 大米淀粉的直链淀粉含量与 ΔH、T₀'、ΔH' 及 85 °C溶解度的相关性明显提升, 与 T₀' 相关性达显著 ($p<0.05$) 水平。未陈化大米淀粉的 D_[4,3]与其 T₀、T₀'、透光率呈正相关, 陈化后, 除透光率外, 大米淀粉的 D_[4,3]与其他分析指标的相关性明显提升, 其中与 T₀由正相关上升至显著正相关、与 T₀' 由显著正相关上升至极显著正相关、与 85 °C膨胀度由负相关上升至显著正相关, 而与透光率由极显著 ($p<0.01$) 正相关下降至显著正相关。未陈化大米淀粉的结晶度与其 T₀、ΔH、ΔH'、85 °C膨胀度呈正相关, 陈化后, 除 T₀' 外, 大米淀粉的结晶度与其他分析指标的相关性明显下降, 其中与 T₀由极显著正相关下降至显著正相关、与 ΔH、ΔH' 由显著正相关下降至不显著正相关、与 85 °C膨胀度仅相关系数下降 (仍呈显著正相关)、与 85 °C溶解度由显著正相关下降至负相关、与透光率由正相关下降至负相关,

而与 T₀' 由显著负相关上升至正相关。

3 结论

3.1 6 个品种未陈化大米淀粉的直链淀粉含量介于 17.24%~22.69%之间, 陈化可显著 ($p<0.05$) 提升大米淀粉直链淀粉含量。未陈化大米淀粉的 D_[4,3]、结晶度分别介于 5.74~7.09 μm、16.75%~19.11%之间, 陈化对大米淀粉显微形态以及短程有序性无明显影响, 陈化明显改变了大米淀粉的 D_[4,3], 降低了大米淀粉的结晶度, 陈化后仅一个品种大米淀粉粒径减小, 其余品种均有不同程度增大。

3.2 新鲜大米淀粉 T₀、T_p 及 ΔH 分别介于 64.77~73.03 °C、71.73~81.13 °C、12.62~18.44 J/g 之间, 陈化对大米淀粉糊化特性有明显影响, 陈化提升了大米淀粉的 T₀, 降低了 ΔH。回生大米淀粉 T₀'、T_p'、ΔH' 分别介于 39.17~45.10 °C、49.40~55.43 °C、0.76~6.33 J/g 之间, 陈化对回生大米淀粉糊化特性有明显影响,

陈化导致大部分品种回生大米淀粉 T_0' 、 T_p' 、 T_c' 上升, $\Delta H'$ 下降。随着温度升高大米淀粉溶解度、膨胀度呈明显上升趋势, 陈化降低了大米淀粉溶解度、膨胀度、透光率。

3.3 大米淀粉的直链淀粉含量与 T_0 、 T_0' 呈正相关, 与 85 °C 膨胀度呈负相关; 大米淀粉的 $D_{[4,3]}$ 与 T_0 呈正相关, 与 $D_{[4,3]}$ 、透光率呈显著 ($p < 0.05$) 正相关; 大米淀粉的结晶度与 ΔH 、 $\Delta H'$ 呈正相关, 与 T_0 、85 °C 膨胀度呈显著正相关。

3.4 对比前人研究结论, 与本研究结果有部分相同, 也有不同之处。项晓月^[8]研究表明, 加温加湿加速陈化处理, 可提高大米淀粉的 T_0 、粒径, ΔH , 但不能显著改变大米淀粉的颗粒微观结构、长程和短程晶体结构。Jin 等^[35]研究表明, 酸和热处理大米淀粉中直链淀粉含量与其溶解度呈显著负相关, 与其 T_0 、 T_p 、 T_c 呈显著正相关, 与其 ΔH 呈弱正相关。涂宗财等^[38]研究表明, 随着大米淀粉粒径减小, 溶解度、膨胀度均呈上升趋势。这些结果的差异, 可能与大米淀粉来源、处理方法有关, 此外, 影响大米淀粉糊化特性、溶解度、膨胀度以及透光率的因素较多, 比如支链淀粉链长及分布、直链淀粉与支链淀粉比值以及大米淀粉中其他非淀粉成分等, 也可能是多因素协同效应。

3.5 本研究以湖北省栽培种植面积较大 6 个稻米品种为原料, 采用加温加湿加速陈化方法, 分析比较了陈化前后大米淀粉部分结构与理化指标, 为湖北省稻米资源合理利用、陈米资源高效利用及稻米加工产品开发提供理论依据。加速陈化也为系统研究陈化对大米食用品质及大米淀粉、大米蛋白结构与特性的影响规律与作用机制提供了有效方法, 为调控大米陈化进程、进一步系统揭示陈化机制提供技术支撑。

参考文献

- [1] Sowbhagya C M, Bhattacharya K R. Changes in pasting behaviour of rice during ageing [J]. Journal of Cereal Science, 2001, 34(2): 115-124
- [2] 钱海峰, 陈玉铭. 大米陈化过程中淀粉性质变化研究[J]. 粮食与饲料工业, 2001, 11: 12-14
QIAN Haifeng, CHEN Yuming. A study on the starch property changes in rice ageing process [J]. Cereal & Feed Industry, 2001, 11: 12-14
- [3] 曾长庚, 黄建运, 叶大庆. 大米陈化研究进展[J]. 粮食储藏, 2017, 46(4): 45-50
ZENG Changgeng, HUANG Jianyun, YE Daqing. Research progress on rice ageing [J]. Grain Storage, 2017, 46(4): 45-50
- [4] Patindol J, Wang Y J, Jane J L. Structure-functionality changes in starch following rough rice storage [J]. Starch/Stärke, 2005, 57: 197-207
- [5] Park I M, Ibáñez A M, Zhong F, et al. Gelatinization and pasting properties of waxy and non-waxy rice starches [J]. Starch/Stärke, 2007, 59: 388-396
- [6] Wang S J, Gao W Y, Liu H Y, et al. Studies on the physicochemical, morphological, thermal and crystalline properties of starches separated from different *Dioscorea opposita* cultivars [J]. Food Chemistry, 2006, 99: 38-44
- [7] 徐欣源. 加工精度对大米陈化过程中理化及品质特性变化的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2013
XU Xinyuan. Effect of degree of milling on the physicochemical and quality properties changes during rice ageing [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013
- [8] 项晓月. 微波诱导对大米陈化行为的调节作用[D]. 南昌: 南昌大学, 2020
XIANG Xiaoyue. Regulation effect of microwave induction on rice aging [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020
- [9] 邱明发, 金铁成, 周瑞芳, 等. 米谷蛋白与淀粉组分在大米陈化过程中的变化[J]. 中国粮油学报, 1998, 13(1): 12-15
QIU Mingfa, JIN Tiecheng, ZHOU Ruifang, et al. The change of oryzenin and starch component during rice ageing process [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1998, 13(1): 12-15
- [10] 王帅. 粳大米陈化过程中化学品质变化规律的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007
WANG Shuai. Study on the changes law of chemical quality in ageing process of Japonica rice [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2007
- [11] 陈业坚, 舒庆尧, 张增勤, 等. 稻谷储藏时间对稻米品质影响的研究[J]. 作物研究, 2001, 4: 9-11
CHEN Yejian, SHU Qingyao, ZHANG Zengqin, et al. Effect of storage on dehulled rice quality [J]. Crop Research, 2001, 4: 9-11
- [12] 王怡杰, 洪雁, 顾振彪, 等. 储藏时间对大米淀粉精细结构的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(5): 45-51
WANG Yijie, HONG Yan, GU Zhenbiao, et al. Effect of storage time on rice starch fine structure [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(5): 45-51
- [13] Huang Y C, Lai H C. Characteristics of the starch fine structure and pasting properties of waxy rice during storage [J]. Food Chemistry, 2014, 152: 432-439
- [14] 顾芳婷. 稻米储藏陈化期间淀粉结果对其理化性质的影响及其相关陈化机制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020
GU Fangting. A starch molecular basis for changes in physical

- and chemical properties during rice storage [J]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020
- [15] Wu P, Li C F, Bai Y M, et al. A starch molecular basis for aging-induced changes in pasting and textural properties of waxy rice [J]. Food Chemistry, 2019, 284: 270-278
- [16] 周显青,刘敬婉.加速陈化对粳稻米饭蒸煮、食味品质及质构特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(6): 8-15
ZHOU Xianqing, LIU Jingwan. Effect of accelerated ageing on cooking and eating quality and texture properties of Japonica rice [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(6): 8-15
- [17] Yang X J, Chi C D, Liu X L, et al. Understanding the structural and digestion changes of starch in heat-moisture treated polished rice grains with varying amylose content [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139: 785-792
- [18] 胡冰,徐睿,邱立忠,等.V-型晶种对大米淀粉回生特性的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(12):62-66
HU Bing, XU Rui, QIU Lizhong, et al. Effect of V-type seed crystal on the retrogradation properties of rice starch [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 62-66
- [19] Wang L, Xie B J, Shi J, et al. Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24: 208-216
- [20] 赵冰,陈佩,庞宇辰,等.不同直链淀粉含量大米淀粉性质的研究[J].食品工业科技,2015,9:72-75
ZHAO Bing, CHEN Pei, PANG Yuchen, et al. Study on properties of rice starches with different amylose content [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 9: 72-75
- [21] 罗曜,杜安林,夏宝林,等.红外辐射对储藏稻谷脂质、淀粉及相关酶的影响[J].中国粮油学报,2020,35(4):100-106
LUO Yao, DU Anlin, XIA Baolin, et al. Effects of infrared radiation on lipid, starch and related enzyme of stored rice [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 100-106
- [22] 董鹏,郭玉宝,朱世民,等.米粉中蛋白组分对陈化后淀粉颗粒间解聚的影响[J].食品与发酵工业,2021.<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028216>
DONG Peng, GUO Yubao, ZHU Shimin, et al. Effect of protein components in rice flour on disaggregation of starch granules after aging [J]. Food and Fermentation Industries, 2021. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028216>
- [23] Lindeboom N, Chang P R, Tyler R T. Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review [J]. Starch/Stärke, 2004, 56: 89-99
- [24] Tukomane T, Varavinit S. Classification of rice starch amylose content from rheological changes of starch paste after cold recrystallization [J]. Starch/Stärke, 2008, 60(6): 292-297
- [25] 王宏伟,李晓玺,黄吉东,等.湿热处理对大米淀粉多层次结构及消化特性的影响[J].现代食品科技,2017,33(6):184-188
WANG Hongwei, LI Xiaoxi, HUANG Jidong, et al. Effect of heat-moisture treatment on the digestibility and multi-scale structures of rice starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(6): 184-188
- [26] 袁璐.微波处理对大米淀粉结构特征及其挥发性风味物质的影响[D].南昌:南昌大学,2017
YUAN Lu. Effects of microwave treatment on structural characteristics of rice starch and its volatile flavor compounds [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017
- [27] 刘成梅,杨晓会,钟业俊,等.糊化及湿热处理对大米淀粉理化特性和微观结构的影响[J].食品工业科技,2016,37(5):49-53
LIU Chengmei, YANG Xiaohui, ZHONG Yejun, et al. Effects of annealing and heat-moisture treatment on the rice starch physicochemical properties and microstructure [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(5): 49-53
- [28] Mahesh G, Balmeel S G, Amarinder S B. Gelatinization and X-ray crystallography of buckwheat starch: effect of microwave and annealing treatments [J]. International Journal of Food Properties, 2008, 11(1): 182-190
- [29] 任静,刘刚,欧全宏,等.淀粉的红外光谱及其二维相关红外光谱的分析鉴定[J].中国农学通报,2015,31(17):58-64
REN Jing, LIU Gang, OU Quanhong, et al. Starch discrimination with Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and two-dimensional correlation infrared spectroscopy (2D-IR) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(17): 58-64
- [30] 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
CHENG Ke. Physicochemical characteristics and molecular structure and their correlation in rice starch [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006
- [31] 李玥.大米淀粉制备方法及其物理化学特性研究[D].无锡:江南大学,2008
LI Yue. Studies on isolation process and physicochemical properties of rice starch [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008