



郑昕玥, 黄思榕, 姜如一, 等. 湿热处理过程中乙醇对粳米结构及性能的影响[J]. 轻工学报, 2025, 40(6): 13-19.  
ZHENG X Y, HUANG S R, JIANG R Y, et al. Effect of ethanol on structures and properties of *Japonica* rice during heat-moisture treatment[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(6): 13-19.  
DOI: 10.12187/2025.06.002

# 湿热处理过程中乙醇对粳米结构及性能的影响

郑昕玥, 黄思榕, 姜如一, 董珂, 谢笑笑, 池承灯

福建师范大学 生命科学学院, 福建 福州 350117

**摘要:**【目的】提升粳米的食物加工适应性与应用价值。【方法】采用湿热处理对粳米进行改性, 研究湿热处理(水分质量分数 25%)过程中, 占水分质量分数分别为 40%、80% 和 120% 的乙醇对粳米结构(直链淀粉含量、形貌特征和结晶结构)及性能(糊化特性、蒸煮损失率和消化性能)的影响规律。【结果】湿热处理能显著降低粳米中直链淀粉及 A 型结晶含量, 促进 V 型结晶结构形成, 提高粳米的热稳定性并降低其黏度和蒸煮损失率; 乙醇的介入不会改变粳米的结晶类型, 但会显著破坏其微观结构, 降低 A 型结晶含量, 提高直链淀粉及 V 型结晶含量。较低质量分数(40%~80%)的乙醇对粳米中 A 型结晶结构的破坏程度较大, 可诱导形成更多的 V 型结晶, 从而显著提高粳米的热稳定性, 降低黏度和蒸煮损失率, 并增加快消化淀粉含量; 当乙醇质量分数提高至 120% 时, 粳米中 A 型结晶含量没有明显变化, V 型结晶含量减少, 致使粳米的热稳定性减弱、黏度提高、蒸煮损失率和慢消化淀粉含量增加。【结论】通过改变湿热处理过程中乙醇的质量分数可定向调控粳米结构与性能的变化。

**关键词:** 粳米; 湿热处理; 乙醇; 结构; 性能

**中图分类号:** TS235.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-1553(2025)06-0013-07

## 0 引言

粳米作为稻米的重要亚类, 常被加工制成白粿、粥品、麻糬等传统食品。粳米中直链淀粉含量较低, 约为 15%~20%, 以其为原料制成的食品口感软糯, 在中国、日本、韩国等东亚国家的主食文化中占据重要地位。然而, 粳米在实际加工中存在黏度较高、热稳定性不足、蒸煮损失率偏高等问题<sup>[1]</sup>, 严重制约了粳米基食品的工业化开发进程。如何通过分子修饰或加工工艺创新来实现粳米黏弹特性、

热力学稳定性及蒸煮完整性的协同提升, 已成为现代谷物科学领域亟待攻克的关键技术难题。

谷物湿热处理是指在较低水分含量(10%~30%)和较高温度(90~130℃)条件下, 对谷物进行 0.25~6 h 短时处理的方法, 具有工艺简单、节能环保、快速安全等优点<sup>[2-3]</sup>。在湿热处理过程中, 谷物中的淀粉与脂质、淀粉与淀粉分子之间的相互作用显著增强, 使得谷物内部结构的稳定性显著提升, 从而有效提高谷物的热稳定性, 并降低其黏度和蒸煮损失率<sup>[2,4-5]</sup>。现阶段, 通过调控湿热处理时间、

收稿日期: 2025-01-30; 修回日期: 2025-04-20; 出版日期: 2025-12-15

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2023J01507)

作者简介: 郑昕玥(2001—), 女, 福建省南平市人, 福建师范大学硕士研究生, 主要研究方向为淀粉及藻类食品加工。E-mail: 1070195668@qq.com

通信作者: 池承灯(1991—), 男, 福建省三明市人, 福建师范大学教授, 博士, 主要研究方向为淀粉类制品加工与应用。E-mail: c\_cd@fjnu.edu.cn

水分含量等因素,可实现粳米黏度和热稳定性的优化<sup>[6]</sup>。乙醇作为国家标准<sup>[7]</sup>允许的食品加工助剂,在食品加工过程中能诱导谷物中淀粉、油脂等组分发生相互作用,从而显著提高食品热稳定性并降低其黏度<sup>[8]</sup>。因此,利用乙醇耦合湿热处理有望通过协同效应更有效地调控粳米的蒸煮特性,特别是其热稳定性、黏度、蒸煮损失率等品质指标。然而,目前有关乙醇耦合湿热处理协同调控粳米功能特性的研究鲜有报道。

基于此,本研究拟对粳米进行乙醇耦合湿热处理,探究该过程中乙醇质量分数对粳米结构特征、热稳定性、黏度、蒸煮损失率及消化特性的影响规律,以期提升粳米的食品加工适应性与应用价值,并为开发高效调控粳米蒸煮品质的新型加工技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料与试剂

粳米,其总淀粉、蛋白质和脂质含量分别为 80.52%、6.42%和 11.83%,种植于福建省莆田市仙游县钟山镇朗桥村,由仙游县乡村振兴研究院提供;醋酸钠、猪胰  $\alpha$ -淀粉酶(1000 U/mg)、淀粉糖苷酶(316 U/mL),美国 Sigma 公司;葡萄糖含量检测试剂盒,爱尔兰 Megazyme 公司;无水乙醇、NaOH、乙酸,西陇科学股份有限公司;KI,上海阿拉丁生化科技股份有限公司; $I_2$ ,上海麦克林生化科技股份有限公司。以上常用试剂均为分析纯。

### 1.2 主要仪器与设备

C-PSK-200 ML 微型磁力搅拌反应釜,南京正信仪器有限公司;SU8000 型场发射扫描电子显微镜(FESEM),日本日立公司;UltimaIV 型 X-射线多晶粉末衍射仪,日本理学公司;RVA 4500 型快速黏度测定仪,澳大利亚波通仪器有限公司;UV5100 H 型紫外-分光光度计,上海元析仪器有限公司;800 Y 型高速多功能粉碎机,浙江铂欧电器有限公司。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 粳米湿热处理** 称取 100 g 粳米,加入适量去离子水,将其水分质量分数调节至 25%,混合均匀,在 4 ℃ 条件下平衡水分 24 h 后,置于微型磁力

搅拌反应釜中;分别按水分质量分数的 0%、40%、80%和 120%添加无水乙醇,于 110 ℃ 条件下反应 2 h,冷却至室温,置于 45 ℃ 烘箱中充分烘干,直至粳米中不存在乙醇。取其中一部分粳米,利用粉碎机进行粉碎处理,过 150 目筛,得到粳米粉,用于后续粳米结构及性能的测试。天然粳米命名为 NR,湿热处理过程中按不同水分质量分数添加无水乙醇的样品分别命名为 RH、RH-40、RH-80 和 RH-120。

**1.3.2 直链淀粉含量测定** 参考 P. Lu 等<sup>[9]</sup>的方法,利用碘染色法测定粳米的直链淀粉含量。准确称取 0.124 1 g 粳米粉(干基,即含 0.1 g 淀粉,下同)于 50 mL 锥形瓶中,加入 1 mL 无水乙醇,充分摇匀使样品均匀分散于乙醇中,然后加入 9 mL 1 mol/L 的 NaOH 溶液,振荡混匀后于沸水中加热分散 10 min,迅速冷却,定容至 100 mL。另取 50 mL 容量瓶,预先加入 25 mL 去离子水,然后加入 2.5 mL 样品溶液、0.5 mL 1 mol/L 乙酸溶液和 0.5 mL 碘试剂(2 g KI 和 0.2 g  $I_2$ ,用去离子水定容至 100 mL),定容后显色 10 min,于 620 nm 波长处测定吸光度。

**1.3.3 形貌特征观察** 选取完整的粳米颗粒,用镊子轻轻掰断,以断面朝上贴于 FESEM 样品台上,喷金处理后观察其断面形貌特征。

**1.3.4 结晶结构测试** 将粳米粉在室温下平衡 24 h 后,均匀铺在 X-射线衍射仪的样品台上并进行扫描处理。具体测试条件为:扫描范围 4°~45°,扫描速度 20°/min,工作电压 40 kV,工作电流 40 mA。通过 Jade 6.0 计算粳米的相对结晶度<sup>[10]</sup>。

**1.3.5 糊化特性测定** 将粳米粉配制成质量分数为 6%的乳浊液,并利用快速黏度测定仪测定其在加热和冷却过程中的黏度变化。具体测试条件为:以 960 r/min 的转速于 50 ℃ 保温 1 min,随后将转速降至 160 r/min 并保持恒定,以 7.5 ℃/min 的速率升温到 95 ℃ 并保温 4 min,随后以 7.5 ℃/min 的速率降温至 50 ℃ 并保温 3 min。

**1.3.6 蒸煮损失率测定** 称取质量为  $m_1$  的粳米颗粒(干基),加入 200 mL 去离子水,于 100 ℃ 条件下加热 20 min 后,轻轻取出粳米颗粒,置于 110 ℃ 条件下烘干至恒重( $m_2$ )。按照下式计算粳米的蒸煮损失率:

蒸煮损失率 =  $\frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$

**1.3.7 消化性能测试** 参考王艳等<sup>[11]</sup>的方法,准确称取 1.241 9 g 粳米粉,加入 20 mL 0.1 mol/L 醋酸钠缓冲液(pH 值为 5.2)中,再加入 5 颗直径为 3 mm 的玻璃珠,于 37 ℃ 条件下保温 5 min 后,加入混合酶液(1989 U 猪胰 α-淀粉酶和 140 U 淀粉糖苷酶),在 37 ℃、190 r/min 水浴条件下分别酶解 20 min 和 120 min 后,取 0.5 mL 酶解液,加入 20 mL 体积分数为 70% 的乙醇溶液灭酶活,然后在 5000 r/min 条件下离心 5 min,取上清液,利用葡萄糖含量检测试剂盒测定其葡萄糖含量,以此计算粳米的快消化淀粉、慢消化淀粉和抗消化淀粉含量<sup>[12]</sup>。

**1.4 数据统计与分析**

所有实验均平行测定 3 次,数据以(平均值±标准差)表示。采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计学分析,方差分析采用 Duncan 多重比较法进行显著性检验( $P<0.05$ )。

**2 结果与分析**

**2.1 湿热处理过程中乙醇对粳米直链淀粉含量的影响**

湿热处理前后粳米中直链淀粉的含量如图 1 所示,其中不同小写字母表示组间有显著性差异( $P<0.05$ ),下同。由图 1 可知,天然粳米(NR)的直链淀粉含量为 18%,经湿热处理后,粳米的直链淀粉含量显著降低( $P<0.05$ ),这可能是湿热处理过程中脂质与直链淀粉形成了复合物所致,这与 X. J. Yang 等<sup>[13]</sup>的研究结果较一致。相较于 RH,RH-40 的直链淀粉含量显著更低( $P<0.05$ ),这可能是因为乙醇的添加提高了脂质在水相中的溶解度,同时乙醇较低的沸点提高了密闭湿热处理环境的压力,促进了粳米中脂质的溶出,进而形成更多的直链淀粉-脂质复合物。随着湿热处理过程中乙醇质量分数的进一步增加,粳米的直链淀粉含量反而显著增多,但 RH-80 与 RH-120 的直链淀粉含量没有显著性差异( $P>0.05$ )。这可能是因为随着乙醇质量分数的增加,一方面淀粉在乙醇中的不溶性导致其分子运动减弱,抑制了直链淀粉-脂质复合物的形成;另一

方面,环境压力的提高诱导淀粉链发生断裂,进而促进直链淀粉的形成<sup>[14]</sup>。

**2.2 湿热处理过程中乙醇对粳米形貌特征的影响**

湿热处理前后粳米的 FESEM 图如图 2 所示。由图 2 可知,NR 的断面光滑、平整,蛋白质(图中白色区域)规整地包裹着淀粉颗粒。经湿热处理后,粳米断面的光滑度降低、褶皱增多,蛋白质层厚度增大,淀粉颗粒的暴露量增多,这可能是因为淀粉与蛋白质在湿热处理过程中发生了糊化和变性行为。相较于 RH,RH-40 的蛋白质边界层更为模糊,断面粗糙度更大,淀粉颗粒暴露量更多,可能是因为乙醇的添加增大了环境压力,使得淀粉与蛋白质结构变化更为明显。随着乙醇质量分数的增加,RH-80 断面的粗糙度进一步增大,蛋白质层的破坏程度更加明显;而 RH-120 断面出现明显的裂缝,蛋白质层变得不明显。这可能与乙醇的添加导致环境压力增大有关,随着环境压力的不断增大,粳米的表现破坏程度进一步加剧,致使其表面出现裂缝。

**2.3 湿热处理过程中乙醇对粳米结晶结构的影响**

湿热处理前后粳米的结晶结构变化如图 3 所示。由图 3a)可知,NR 在 15°、17°、18°和 23°处显示明显的衍射峰,表明粳米含有典型的 A 型结晶结构<sup>[8]</sup>。经湿热处理后,粳米的 A 型结晶衍射峰强度明显降低,表明其淀粉的结晶结构发生了局部糊化,这与王艳等<sup>[11]</sup>的研究结果较一致。此外,相较

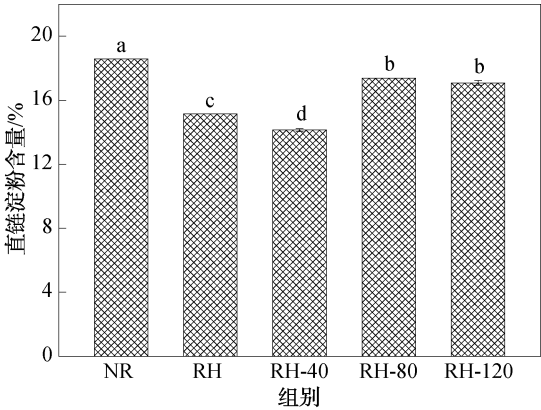


图 1 湿热处理前后粳米中直链淀粉的含量  
Fig. 1 Amylose content of Japonica rice pre- and post-heat-moisture treatment



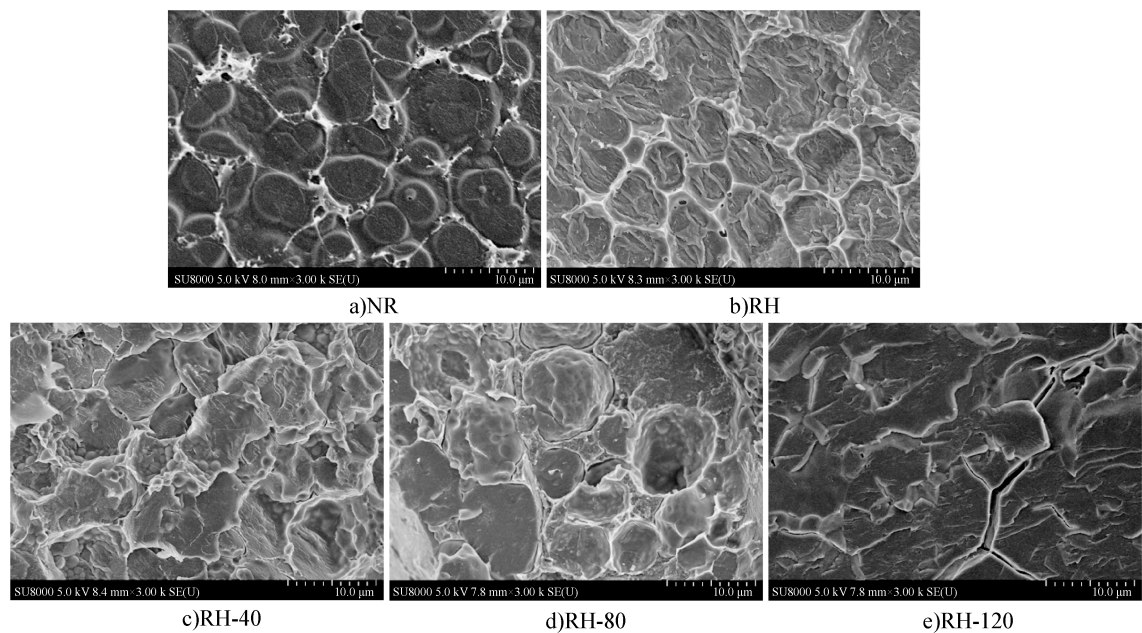


图 2 湿热处理前后粳米的 FESEM 图

Fig. 2 FESEM micrographs of *Japonica* rice pre- and post-heat-moisture treatment

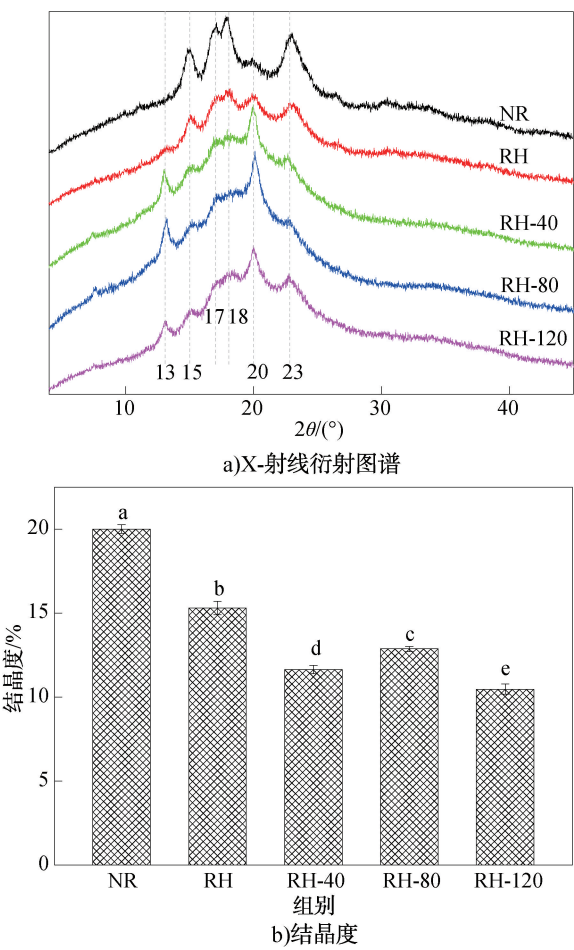


图 3 湿热处理前后粳米的结晶结构变化

Fig. 3 Changes in crystal structure of *Japonica* rice pre- and post-heat-moisture treatment

于 NR, RH 在 13° 和 20° 处的衍射峰强度明显增强, 说明其淀粉与脂质在湿热处理过程中结合形成了 V 型结晶结构<sup>[10]</sup>。与 RH 相比, 湿热处理过程中乙醇的介入不会改变淀粉的结晶类型, 但会明显降低淀粉 A 型结晶的特征峰强度, 同时显著增强淀粉 V 型结晶的特征峰强度。这可能是因为: 1) 乙醇在湿热处理过程中会提高环境压力, 导致淀粉 A 型结晶在压力场中的破坏程度加剧; 2) 乙醇会促进粳米中脂质的迁移, 从而促进 V 型结晶的形成<sup>[8]</sup>; 3) 乙醇在湿热处理过程中能直接与淀粉结合形成络合物, 进一步促进 V 型结晶的形成<sup>[8]</sup>。随着乙醇质量分数的增加, 粳米在 15° 和 23° 处的 A 型结晶衍射峰强度呈先减弱后增强的趋势, 而在 13° 和 20° 处的 V 型结晶衍射峰强度呈先增强后减弱的趋势。这一方面可能是因为乙醇含量的增加加速了脂质的扩散, 促使淀粉-脂质复合物及淀粉-乙醇复合物的形成; 另一方面, 过量的乙醇会限制淀粉分子链的运动, 进而抑制淀粉 A 型结晶的破坏及 V 型结晶的形成。

由图 3b) 可知, 湿热处理会显著降低粳米的结晶度 ( $P < 0.05$ ), 这与淀粉的结晶结构被破坏有关。此外, 乙醇的引入进一步降低了粳米的结晶度, 并且随着乙醇质量分数的增加, 粳米的结晶度呈现先升高后降低的趋势, 这主要与淀粉 A 型结晶结构的破坏及 V 型结晶结构的形成有关。



2.4 湿热处理过程中乙醇对粳米粉糊化特性的影响

湿热处理前后粳米粉的糊化曲线如图 4 所示。由图 4 可知,随着加热温度升高到 95 ℃,NR 粉的黏度呈先升高后降低的趋势,这与淀粉在水热加工过程中发生溶胀与颗粒破损有关。当加热温度降低到 50 ℃,NR 粉的黏度逐步增大,这与淀粉在冷却过程中发生短期重排行为有关。经湿热处理后,粳米粉的溶胀温度显著提高,且整体黏度显著低于 NR 粉( $P<0.05$ ),表明湿热处理可显著提高粳米的热稳定性并降低其黏度,这与 H. W. Wang 等<sup>[15]</sup>的研究结果较一致。乙醇的介入不会明显改变粳米粉的起始溶胀温度,但会显著降低其整体黏度且在 95 ℃恒温过程中未出现颗粒崩解的现象,表明样品的热稳定性显著增强。这可能是因为 V 型结晶结构的形成抑制了淀粉颗粒的溶胀<sup>[16]</sup>。随着乙醇质量分数的增加,粳米粉的整体黏度呈先无明显变化后显著增大的趋势。RH-120 的 V 型结晶含量低于 RH-40 和 RH-80,这可能是导致三者黏度差异的主要原因。

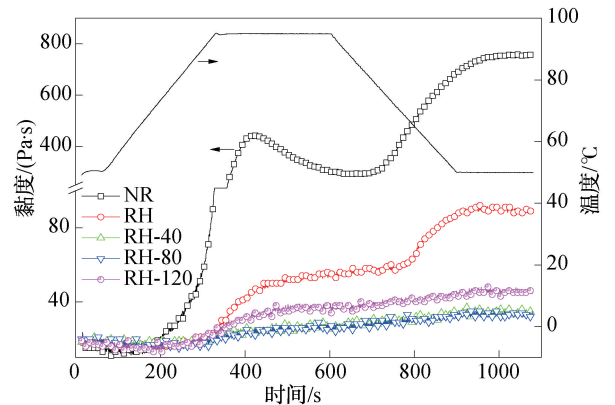


图 4 湿热处理前后粳米粉的糊化曲线  
Fig. 4 Pasting viscosity curves of Japonica rice flour pre- and post-heat-moisture treatment

2.5 湿热处理过程中乙醇对粳米蒸煮损失率和消化性能的影响

湿热处理前后粳米的蒸煮损失率和消化性能的变化见表 1。由表 1 可知,相较于 NR,湿热处理显著降低了粳米的蒸煮损失率( $P<0.05$ ),这可能与湿热处理会显著提高粳米的水热稳定性有关。相较于 RH,乙醇介入处理后,粳米的蒸煮损失率进一步发生改变。相较于 NR,RH-40 的蒸煮损失率没有显著性变化。随着乙醇质量分数的增加,粳米的蒸煮损失率逐渐增大。虽然 RH-40 与 RH-80 的糊化曲线没有显著性差异,但后者在湿热处理过程中结构遭到的破坏程度较大(图 2 和图 3a)),导致其蒸煮损失率较大。相较于 RH-40 和 RH-80,RH-120 的蒸煮损失率显著增大( $P<0.05$ ),这可能与粳米的结构和水热稳定性有关。RH-120 的水热稳定性低于 RH-40 和 RH-80,且其颗粒在湿热处理过程中形成了明显裂缝(图 2),致使其蒸煮损失率显著增大。相较于 NR,RH-120 的蒸煮损失率更高,说明较高质量分数乙醇的介入不利于粳米在蒸煮过程中品质的稳定性。

一般而言,湿热处理会导致淀粉颗粒发生局部糊化,从而提高快消化淀粉含量并降低慢消化和抗消化淀粉含量<sup>[10]</sup>。相较于 NR,经湿热处理后粳米的快消化淀粉含量显著升高、慢消化淀粉含量显著降低( $P<0.05$ ),而抗消化淀粉含量未发生明显变化。这可能一方面是因为湿热处理会破坏粳米的结晶结构,另一方面又促进 V 型结晶结构的形成,而 V 型结晶结构属于一种新型抗消化淀粉结构<sup>[17]</sup>。乙醇介入后,粳米的快消化淀粉含量显著高于 RH,而慢消化淀粉含量则显著低于 RH( $P<0.05$ ),这可能与环境压力升高有关。乙醇在湿热处理过程中

表 1 湿热处理前后粳米的蒸煮损失率及消化性能

Table 1 Cooking loss rate and digestive properties of Japonica rice pre- and post-heat-moisture treatment %				
组别	蒸煮损失率	快消化淀粉含量	慢消化淀粉含量	抗消化淀粉含量
NR	13.44±0.44 <sup>b</sup>	26.14±2.73 <sup>d</sup>	40.33±0.82 <sup>a</sup>	32.00±1.73 <sup>a</sup>
RH	6.99±0.85 <sup>d</sup>	49.70±1.50 <sup>e</sup>	16.65±1.30 <sup>b</sup>	33.36±0.19 <sup>a</sup>
RH-40	5.33±1.07 <sup>d</sup>	59.95±0.39 <sup>b</sup>	6.97±0.04 <sup>c</sup>	33.08±0.45 <sup>a</sup>
RH-80	9.28±1.71 <sup>c</sup>	63.86±2.15 <sup>a</sup>	1.64±0.12 <sup>e</sup>	34.51±2.02 <sup>a</sup>
RH-120	16.57±1.44 <sup>a</sup>	60.91±0.59 <sup>b</sup>	5.58±1.71 <sup>d</sup>	32.90±2.50 <sup>a</sup>

注:同列不同肩标字母表示组间有显著性差异( $P<0.05$ )。

会提升环境压力,导致粳米的结晶度降低,从而促进粳米酶解,提高快消化淀粉含量。此外,乙醇的介入会提高 V 型结晶结构含量,导致粳米的抗消化淀粉含量与 RH 没有明显差异。然而,随着乙醇质量分数的增加,粳米的快消化淀粉含量呈先增高后降低的趋势,而慢消化淀粉含量则呈先降低后升高的趋势。这可能是因为:乙醇质量分数的增大可提高环境压力,加剧粳米 A 型结晶结构的破坏;此外,过量的乙醇可能抑制淀粉分子链的运动,减弱粳米 A 型结晶结构的破坏程度。

### 3 结论

本文研究了乙醇耦合湿热处理对粳米结构与性能的影响,得到如下结论:湿热处理可显著促进粳米中淀粉 V 型结晶结构的形成,提高粳米的热稳定性并降低其黏度和蒸煮损失率;而乙醇的介入可进一步提高淀粉 V 型结晶含量、降低粳米黏度,但会增大粳米的蒸煮损失率。较低质量分数(40%~80%)的乙醇不会改变粳米中淀粉的结晶类型,但会加剧粳米颗粒结构的破坏程度,同时降低淀粉 A 型结晶含量、促进 V 型结晶结构的形成,进而显著增强粳米的热稳定性,降低蒸煮损失率和慢消化淀粉含量;过高质量分数(120%)乙醇的介入可能会抑制淀粉分子链的运动,导致淀粉 A 型结晶结构的破坏程度降低、V 型结晶含量减少,蒸煮损失率和慢消化淀粉含量增大。由此可见,通过调控粳米湿热处理过程中乙醇的质量分数,可实现粳米结构与性能的定向调控。然而,本文仅初步揭示了湿热处理过程中乙醇质量分数对粳米结构与性能的影响规律,而导致其结构与性能变化的作用机理尚未明确。粳米含有的淀粉、蛋白质、脂质、多酚、维生素和矿物质等多种成分在湿热处理过程中结构、含量及相互作用的变化规律与粳米性能之间的关系,将是解析乙醇耦合湿热处理介导粳米性能变化的研究重点。

### 参考文献:

[1] ZHANG W, LIU Y X, LUO X L, et al. Pasting, cooking, and digestible properties of *Japonica* rice with different amylose contents [J]. International Journal of Food

Properties, 2022, 25(1): 936-947.

[2] 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.

[3] SCHAFRANSKI K, ITO V C, LACERDA L G. Impacts and potential applications: A review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106690.

[4] HE H, ZHENG B, WANG H W, et al. Insights into the multi-scale structure and in vitro digestibility changes of rice starch-oleic acid/linoleic acid complex induced by heat-moisture treatment[J]. Food Research International, 2020, 137: 109612.

[5] 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.

[6] LIN Z X, ZHANG R, WU Z T, et al. Prolonging heat-moisture treatment time at medium moisture content optimizes the quality attributes of cooked brown rice through starch structural alteration [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135561.

[7] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard standards for the use of food additives: GB 2760—2024 [S]. Beijing: China Standards Press, 2024.

[8] ZHOU X, XING Y R, MENG T T, et al. Preparation of V-type cold water-swelling starch by ethanolic extrusion [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 271: 118400.

[9] LU P, LI X X, JANASWAMY S, et al. Insights on the structure and digestibility of sweet potato starch: Effect of postharvest storage of sweet potato roots [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145: 694-700.

[10] CHI C D, REN W W, YANG Y, et al. Starch ordered structures control starch reassembly behaviors during heat-moisture treatment for modulating its digestibility [J]. Food Chemistry, 2024, 430: 136966.

[11] 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.

[12] CHI C D,LI X X,LU P,et al. Dry heating and annealing treatment synergistically modulate starch structure and digestibility [ J ]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,137:554–561.

[13] 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.

[14] APOSTOLIDIS E,MANDALA I. Modification of resistant starch nanoparticles using high-pressure homogenization treatment[ J ]. Food Hydrocolloids,2020,103:105677.

[15] WANG H W,ZHANG Y S,SU P P,et al. Insights into the aggregation structure and physicochemical properties of heat-moisture treated wheat starch and its associated effects on noodle quality[ J ]. Journal of Cereal Science, 2023,112:103704.

[16] CHEN B Y,GUO Z B,ZENG S X,et al. Paste structure and rheological properties of lotus seed starch-glycerin monostearate complexes formed by high-pressure homogenization[ J ]. Food Research International,2018, 103:380–389.

[17] CHI C D,LI X X,HUANG S X,et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility:A review [ J ]. Trends in Food Science and Technology, 2021,109:154–168.

Effect of ethanol on structures and properties of *Japonica* rice during heat-moisture treatment

ZHENG Xinyue,HUANG Sirong,JIANG Ruyi,DONG Ke,XIE Xiaoxiao,CHI Chengdeng  
College of Life Sciences,Fujian Normal University,Fuzhou 350117,China

**Abstract:** 【 Objective 】 To improve the food processing adaptability and practical value of *Japonica* rice. 【 Methods 】 Heat-moisture treatment (moisture content: 25%) was used for the modification of *Japonica* rice. The effects of ethanol at 40%, 80%, and 120% of the moisture content on structural properties (amylose content, morphology, crystalline structure) and functional properties (pasting properties, cooking loss, digestibility) were systematically investigated. 【 Results 】 Heat-moisture treatment significantly reduced the amylose content and A-type crystallinity, while promoting the formation of V-type crystalline structures. This enhanced thermal stability and reduced viscosity and cooking loss. The addition of ethanol did not alter the crystalline structure type but induced microstructural disruption, reducing A-type crystallinity while increasing amylose content and V-type crystalline formation. Moderate ethanol concentrations (40%~80%) caused greater disruption of A-type structures and promoted V-type crystallization, thereby improving thermal stability and rapidly digestible starch content while decreasing viscosity and cooking loss. At 120% ethanol concentration, A-type crystallinity remained stable but V-type crystalline formation decreased, leading to reduced thermal stability, increased viscosity and cooking loss, and elevated slowly digestible starch content. 【 Conclusion 】 The structural and functional properties of *Japonica* rice can be precisely modulated by controlling ethanol concentrations during heat-moisture treatment.

**Key words:** *Japonica* rice; heat-moisture treatment; ethanol; structure; property

[责任编辑:杨晓娟 申慧珊]