真空联合超声对大米吸水和蒸饭特性的影响

黎秋云， 李 森， 管 骁*， 黄 凯， 朱凤博

（上海理工大学 医疗器械与食品学院，上海 200093）

摘要： 浸泡和蒸饭是黄酒等米制品生产中的重要环节。浸泡不仅耗时而且影响蒸饭过程，导致出现米饭夹生或过熟等现象，影响后续的糖化和发酵过程。为了提高大米的吸水速度，改善米饭的糊化效果，采用真空超声同时处理、先真空后超声处理和先超声后真空处理对大米进行浸泡处理，研究其对大米吸水特性和蒸饭特性的影响。结果发现：先真空后超声处理能加速水分的渗透和扩散，降低大米的硬度，显著缩短大米的蒸饭时间，抑制米饭的老化。本研究为先真空后超声处理在黄酒生产中的应用提供了参考。

关键词： 真空；超声；大米；吸水；蒸饭

中图分类号：TS 21　**文章编号：**1673-1689(2020)12-0042-07　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.12.007

Effect of Vacuum Combined with Ultrasonic on the Hydration and Steaming Properties of Rice

LI Qiuyun, *LI Sen*, *GUAN Xiao**, *HUANG Kai*, *ZHU Fengbo*

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Soaking and steaming are important operations in the processing of rice products such as Chinese rice wine. Soaking is not only time-consuming but also affects the steaming process of rice, resulting in half-cooked or over-cooked rice, which affects the subsequent saccharification and fermentation. In order to increase the water absorption rate of rice and improve the gelatinization of steamed rice, the rice was soaked by simultaneous vacuum and ultrasonic treatment, vacuum followed by ultrasonic treatment, and ultrasonic followed by vacuum treatment, respectively. Their effects on water absorption and steaming characteristics of rice were discussed. It was found that vacuum followed by ultrasonic treatment could accelerate the penetration and diffusion of water, reduce the hardness of rice, significantly shorten the steaming time and inhibit the retrogradation of steamed rice. This study provides the possibility of the application of vacuum followed by ultrasonic treatment in the production of Chinese rice wine.

Keywords: vacuum, ultrasonic, rice, water absorption, steamed rice

收稿日期： 2020-03-19

基金项目： 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0401102)；全国粮食行业青年拔尖人才项目(LQ2018204)。

* **通信作者：** 管 骁(1979—)，男，博士，教授，博士研究生导师，主要从事食品功能与营养、食品资源精深加工、食品生物纳米材料、食品安全品质监测与控制等研究。E-mail：gnxo@hotmail.com

糯米是传统黄酒生产的原料，但由于粳米的亩产量比糯米高，浙江、江苏两省已将粳米作为黄酒生产的主要原料之一[1]。浸米是黄酒生产过程中的重要一环，大米浸泡的效果决定大米糊化的效率和效果。生产中常常因大米浸泡或糊化效果差出现夹生、过熟或老化的米饭，直接影响糖化和发酵，最终对黄酒的品质产生影响[2]。传统工艺中为了使大米充分吸水润胀，需要浸泡 2~3 d，浸米周期长增加了污染风险。大米的吸水特性与支链淀粉含量相关，支链淀粉含量越高吸水率越高，而粳米的支链淀粉含量远低于糯米，因此更需要对粳米的吸水特性进行优化。

有研究发现超声处理可以提高糙米[3]和精米[4]吸收水分的速度，缩短最适蒸煮时间。另外，据报道，在真空条件下浸泡，糙米[5]和稻谷[6]发生水化时达到水分饱和所需的时间比在大气压力下显著减少。近年来，有学者将真空处理和超声处理结合在一起使用，发现真空联合超声处理在提高食品浸泡效果上比单一的处理更显著。Yilmaz 等[7]研究发现在真空阶段和恢复期施加超声处理后，苹果片的钙、总黄酮和总花青素的含量增加了 10%~30%。Mashkour 等[8]的研究显示先超声预处理 24 min 再进行真空浸渍后马铃薯铁的含量比真空浸渍的高 72.5%。

因此，本研究中采用真空联合超声处理对大米进行浸泡处理，研究其对大米吸水特性和蒸饭特性的影响，以期提高大米吸水速度、提高黄酒生产环节中浸米的质量、改善米饭的糊化效果，为缩短黄酒生产周期、提高黄酒品质的稳定性提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

金龙鱼东北大米：益海嘉里粮油工业有限公司产品；氢氧化钠、四水酒石酸钾钠、无水亚硫酸钠、醋酸：国药集团化学试剂有限公司产品；3,5-二硝基水杨酸、苯酚、葡萄糖淀粉酶(10 万 U/mL)：上海阿拉丁生化科技股份有限公司产品。

1.2 仪器与设备

ME204E 电子分析天平：梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产品；Milli-超纯水设备：美国密理博公司产品；SHZ-D(Ⅲ)循环水式真空泵：上海予华仪器设备有限公司产品；BILON22-600 槽式超声波仪：上海比朗仪器制造有限公司产品；PQ001 低场核磁共振分析仪：苏州纽迈分析仪器股份有限公司产品；TA-XT2i 质构仪：上海圣宝实业发展有限公司产品；MZ-ZG26Easy401 电蒸锅：广州美的生活电器制造有限公司产品；UV-2800A 紫外可见分光光度计：尤尼柯(上海)仪器有限公司产品；DSC8500 差示扫描量热仪：美国 PE 公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 真空联合超声处理 称取一定量的大米样品置于上嘴抽滤瓶中，以大米:水=1:4 的比例加入高纯水，然后进行真空联合超声处理。真空度为-0.1 MPa 由循环水式真空泵提供，根据 Li 等[4]确定超声波功率为 300 W。本研究真空联合超声处理的处理方式分为 3 种：真空处理和超声处理同时处理一定的时间；先超声处理 1/2 的时间后再进行真空处理 1/2 的时间；先真空处理 1/2 的时间后再进行超声处理 1/2 的时间。同时，进行常规浸泡、单一的真空处理浸泡和单一的超声处理浸泡。

1.3.2 水分含量的测定 称取 10.00 g 大米，按 1.3.1 的方法进行不同的浸泡处理，处理时间为 10、20、30、40、50、60、90、120 min。处理规定的时间后，将大米捞出沥干水分，用吸水纸将大米表面的水擦干称质量记为 M_w，接着将大米置于 105 ℃烘箱中干燥至质量恒定记为 M_d。按(1)式计算不同浸泡处理后大米的水分质量分数 I：

$$I=(M_w-M_d)/M_w\times100\% \quad (1)$$

式中，I 为水分质量分数(%)；M_w 为浸泡后干燥前大米的质量(g)；M_d 为干燥后大米的质量(g)[9]。

1.3.3 浸出固形物的测定 将 1.3.2 中每个处理时间的浸米水全部收集到干燥至质量恒定的耐高温离心管中，以 4 000 r/min 的转速离心 30 min 后去掉上清液，将装有沉淀的离心管置于 105 ℃烘箱中干燥至质量恒定，浸出的固形物的量按每 100 g 大米中固体的克数来计算[4]。

1.3.4 大米水分状态的测定 将各个时刻不同浸泡处理的大米捞出沥干水分，用吸水纸擦去表面水分，精确称取(2.000±0.000 5) g 的大米样品于直径为 15 mm 的核磁试管底部，接着将试管置于磁场线圈中心。采用 CPMG 序列测定不同浸泡处理后大米样品的自旋-自旋弛豫时间(T_2)，实验参数：采样点数 TD=40 020，采样频率 SW=200 kHz，重复采样等待时间 TR=2 000 ms，重复扫描次数 NS=16 次，半

回波时间 τ=100 μs，回波个数Echo Count =1 000个。每个样品重复测定 3 次,利用 MultiExp Inv 分析软件进行核磁数据反演[10]。

1.3.5 硬度的测定 随机取单粒完整且形态一致的浸泡后米粒置于载物台中心位置,使用直径为 10 mm 的圆柱形探头对大米进行全质构测试。测试参数:测试前、后速度均为 1.0 mm/s,测试速度为 0.5 mm/s,压缩形变为 75%,接触点数值为 5 gf。每个处理测 30 组,剔除超平均值±15%的数值后求平均值[11]。

1.3.6 最短蒸饭时间的测定 黄酒酿造中以大米为原料只蒸不煮,因此本文中米饭在蒸煮采用米与水分离的形式隔水蒸饭。称取 25.00 g 大米,不同处理浸泡后沥干米浆水,置于电蒸锅蒸笼上(直径 50 mm,高 20 mm)圆形冲孔塔模内,水沸腾后开始计时进行隔水蒸饭。10 min 后,将塔模连米饭一起取出,从同一层(表面往下 8 mm)非边缘处随机抽取 10 粒完整的米饭,用刀将米饭从中间切开,观察并记录没有白心的米粒数,内无白心表明大米完全糊化。从第 10 分钟以后每隔 2 min 重复上述操作,直至连续 2 个时间点的 10 粒米饭均无白心。重复试验 3 次,取平均值。

1.3.7 米饭糊化度的测定 在最短蒸饭时间蒸饭后,干燥,磨粉过 100 目筛。称 100 mg 的米饭粉末 2 份放入 A、B 离心管中,在 A 中先后加入 8 mL 高纯水和 1 mL 浓度为 2 mol/L 的醋酸溶液;在 B 中先后加入 7.3 mL 高纯水和 0.7 mL 浓度为 5 mol/L 的 NaOH 溶液，粉末完全溶解后再加入 1 mL 浓度为 5 mol/L 醋酸溶液。加入 1 mL 体积分数为 1%的葡萄糖淀粉酶溶液 50 ℃水浴反应 60 min,每隔 10 min 振荡摇匀 1 次。结束后沸水浴 5 min 灭酶,冷却后以 4 000 r/min 的转速离心 15 min，取上清液稀释 20 倍,按 DNS 法在 540 nm 波长下测吸光度,按式(2)计算米饭的糊化度:

$$糊化度=S_A/S_B\times100\% \quad (2)$$

式中,S_A 为被检液的吸光度;S_B 为完全糊化液的吸光度[12]。

1.3.8 米饭老化特性的测定 将按最短蒸饭时间得到的米饭装入自封袋中放在 4 ℃保存 7 d。精确称取老化米饭样品约 10.0 mg 于液体坩埚中，压盖密封后放进样品室进行测试,以不加样的空白坩埚作为对照。测试参数:扫描温度范围为 15~90 ℃,升温速率为 10 ℃/min[13]。

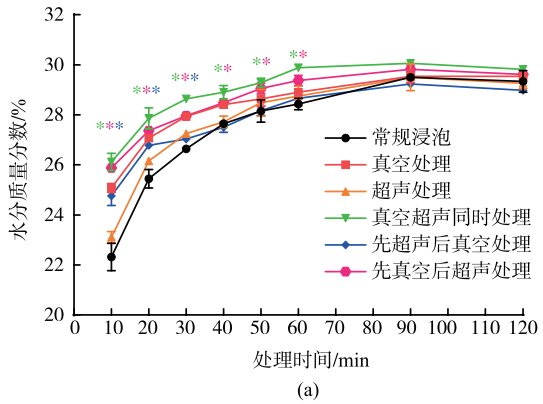
1.3.9 数据分析 采用 Excel 软件处理数据，采用 SPSS 17.0 数据处理软件对数据进行统计分析,结果表示为平均值±标准差，所有的分析图均采用 Prism 7.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 真空联合超声对大米水分质量分数和总固形物浸出量的影响

如图 1(a)所示,在处理的初始阶段大米的吸水速率非常快,随着处理时间的增加吸水速率逐渐减慢,当处理时间达到 60~120 min 时水分质量分数达到平衡。这与 Tomita 等[14]报道的趋势一致。处理前 60 min，真空超声同时处理组和先真空后超声处理组大米的水分质量分数显著（P<0.05）高于普通浸泡,说明真空超声同时处理和先真空后超声能提高大米的吸水速度,这可能归因于真空处理的水动力机制[15]和超声处理的空化效应[16]的双重作用。而先超声后真空处理组只在前 30 min 水分质量分数显著高于常规浸泡,30 min 后没有显著差异，这可能是随着超声处理时间的增加，淀粉等物质浸出增加,后再进行真空处理不产生影响。

真空联合超声处理不同时间总固形物的浸出量如图 1(b)所示。真空联合超声处理组总固形物浸出量均显著(P<0.05)高于常规浸泡,其中真空超声同时处理组和先超声后真空处理组的总固形物浸出量与超声处理组(固形物浸出量最高)相当。这是因为超声处理的机械效应和空化效应对大米表面造成侵蚀和破坏,使淀粉等物质快速溶出[4]。而先真空后超声处理组固形物浸出量低于同时处理组和先超声后真空处理组,说明真空预处理抑制超声处理过程中固形物的浸出。



(a)

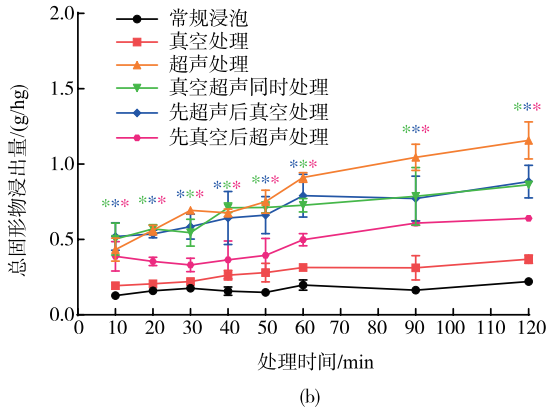


图 1　真空联合超声对大米水分质量分数和总固形物浸出量的影响

Fig. 1　Effect of vacuum combined with ultrasonic treatment on water content and total leached solids of rice

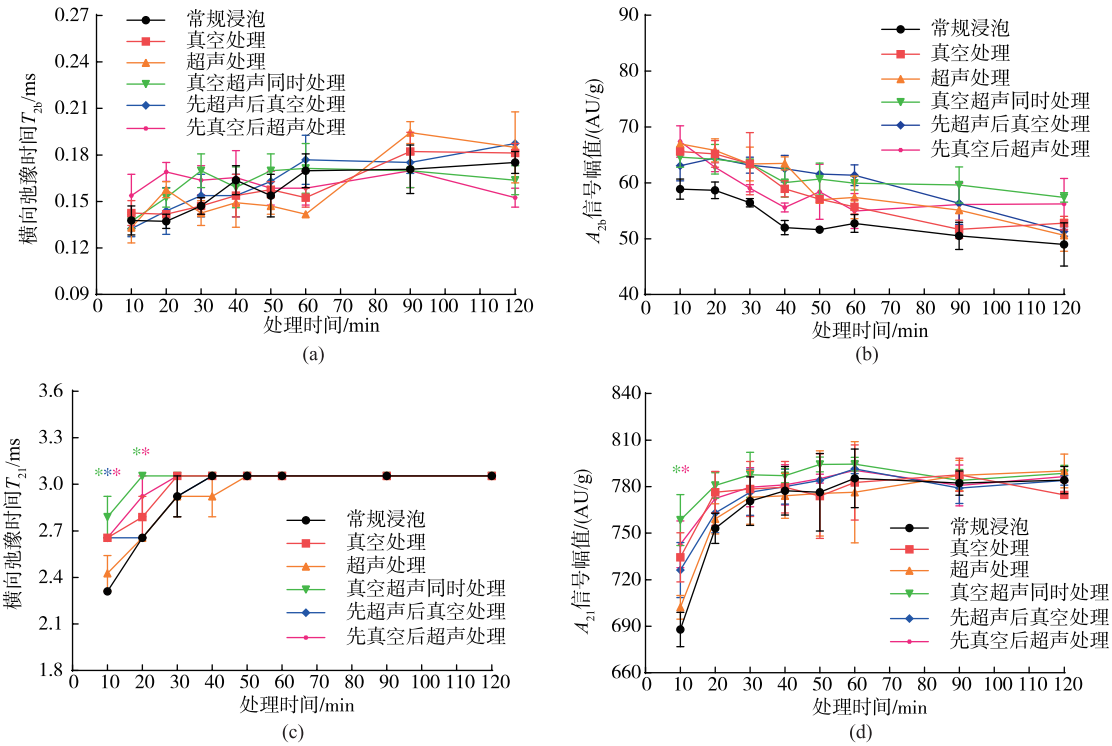
2.2　真空联合超声对大米水分状态的影响

低场核磁共振技术可以提供大米浸泡过程中水质子的动力学信息，横向弛豫时间 T_2 表征水质子的自由度，T_2 越短说明水质子被结合得越紧密，T_2 越长说明水质子越自由[17]。根据报道，大米中存在 3 种状态的水：强结合水质子，弛豫时间 T_{2b} 范围为 0.01~1 ms；中等强度结合水质子，弛豫时间 T_{21} 范围为 1~10 ms；自由水质子，弛豫时间 T_{22} 范围为 10 ~ 100 ms；对应弛豫信号幅值 A_{2b}、A_{21} 和 A_{22} 分别表征强结合水、中等强度结合水和自由水的质子密度[18]。

真空联合超声处理过程中大米内部水分状态的变化情况如图 2 所示。随着处理时间的增加，强结合水的弛豫时间 T_{2b} 略有增加，对应的质子密度 A_{2b} 略有下降，这说明外界水分子的不断渗入会影响强结合水质子与大分子的结合程度，强结合水质子的自由度增加，部分转化为中等强度结合水。

中等强度结合水质子包括晶粒内与外界进行缓慢交换的束缚水以及支链淀粉和谷氨酰胺内的可交换水质子[19]。真空超声同时处理和先真空后超声处理 10 min 后，中等强度结合水质子的弛豫 T_{21} 和质子密度 A_{21} 显著（$P<0.05$）大于常规浸泡，说明真空超声同时处理和先真空后超声处理能引起水分子的快速渗透，致使中等强度结合水质子的流动性增强，质子密度增加。

T_{22} 表示大分子聚合物间隙之间游离的水质子的弛豫时间，处理的前 30 min，除真空超声同时处理组和先真空后超声处理组外其他处理组 T_{22} 呈下降趋势，Li 等[4]推测随着水分渗透淀粉颗粒开始膨胀，膨胀的淀粉与水分子相互作用从而降低了水分子的自由度。我们推测真空超声同时处理和先真空



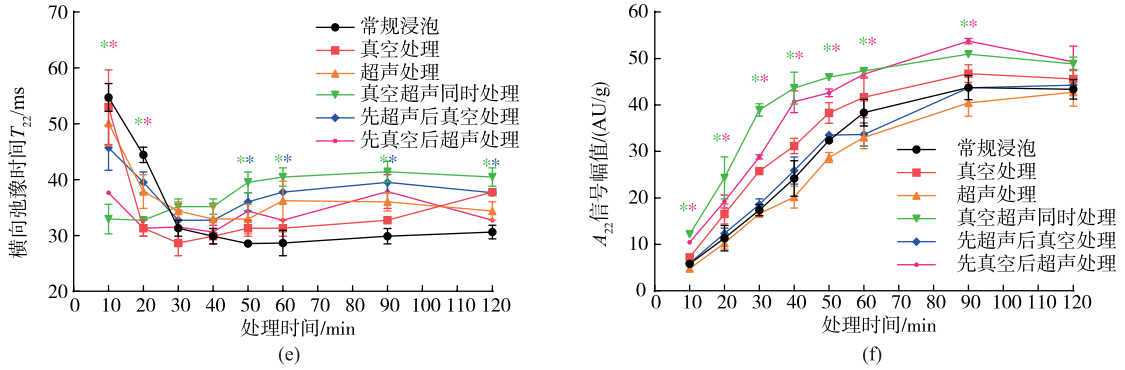


图 2　真空联合超声对大米水分状态的影响

Fig. 2　Effect of vacuum combined with ultrasonic treatment on moisture state of rice

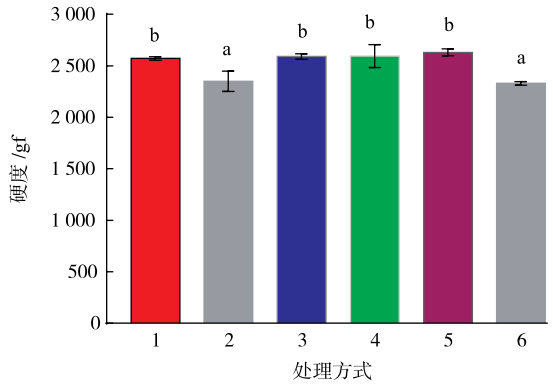
后超声处理在前 10 min 淀粉颗粒已经开始大量吸水膨胀了,因而 T_{22} 在前 30 min 小于其他处理的,这从图 1 两者的水分质量分数显著高于其他处理中可以得证实。50 min 后,真空超声同时处理组和先超声后真空处理组的 T_{22} 显著高于常规浸泡组,说明水分子流动性较强。处理前 90 min,真空超声同时处理组和先真空后超声处理组自由水的质子密度 A_{22} 显著大于常规浸泡组,表明真空超声同时处理和先真空后超声处理能加速水分子的渗入和扩散。

2.3　真空联合超声对大米硬度的影响

硬度是评价浸米质量的指标之一,对大米的蒸饭品质也有一定影响,浸泡后大米的硬度如图 3 所示,真空处理组和先真空后超声处理组大米硬度显著(P<0.05)低于常规浸泡组,而超声处理、真空超声同时处理和先超声后真空处理没有表现出显著差异。以上结果说明真空处理对降低浸泡后大米的硬度具有重要作用,有研究发现真空处理使蛋白质浸出增加,削弱了淀粉与蛋白质的相互作用,从而可以降低大米的硬度[20];而超声处理并不能对大米硬度产生影响,反而会对真空处理有一定的抑制作用,因此真空超声同时处理组和先超声后真空组大米的硬度并没有变化。

2.4　真空联合超声对大米最短蒸饭时间和糊化度的影响

黄酒生产过程中,大米浸泡后要进行隔水蒸饭。蒸饭是一道耗时耗能的工序,缩短蒸饭的时间、减少能源的消耗具有重要意义。由图 1 可知,常规浸泡 90 min 大米吸水达到了平衡,适当延长浸泡时间有利于水分分布更均匀[2],因此蒸饭实验中大米的浸泡设定时间为 120 min。真空联合超声处理 30 min 后水分质量分数变化缓慢,且处理时间越长固形物浸出越多;因此确定处理时间为 30 min,再常规浸泡 90 min,然后进行蒸饭实验。



1. 常规浸泡;2. 真空浸泡;3. 超声处理;4. 真空超声同时处理;5. 先超声后真空处理;6. 先真空后超声处理。图中不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 3　真空联合超声对大米硬度的影响

Fig. 3　Effect of vacuum combined with ultrasonic treatment on hardness of rice

大米的最短蒸饭时间如表 1 所示,真空联合超声处理组的最短蒸饭时间显著(P<0.05)小于常规浸泡组的,其中真空超声同时处理组和先真空后超声处理组大米的最短蒸饭时间缩短了 60%,可能是因为真空超声同时处理和先真空后超声处理加速了水分的渗透和扩散,使大米内部的水分分布更均匀,有利于大米快速均匀的糊化。而 5 个处理组中,超声处理组和先超声后真空处理组的最短蒸煮时间显著高于其他 3 个处理组,说明超声预处理不仅不利于缩短蒸饭时间还可能会抑制真空处理的效果。Cui 等[3]认为超声处理会诱导糙米内的聚合物重新排列,致使大米需要更多的能量来使其完全糊

化，因而蒸饭时间长。

糊化度指米饭淀粉的糊化程度，是米饭的重要品质之一。米饭熟度均匀一致才有利于糖化或发酵。最短蒸饭时间获得的米饭的糊化程度如表 1 所示。真空联合超声处理组米饭的糊化度与常规浸泡组的相比没有显著性差异，说明真空联合超声处理在缩短大米最短蒸饭时间的同时对米饭的糊化度不会造成影响。

表 1　真空联合超声对大米最短蒸饭时间和糊化度的影响

Table 1　Effect of vacuum combined with ultrasonic treatment on the minimum steaming time and gelatinization degree of rice

处理方法	蒸煮时间/min	糊化度/%
常规浸泡	56±1.63^{d}	96.24±1.88^{a}
真空处理	27.33±1.15^{b}	97.93±1.00^{a}
超声处理	78.67±0.82^{e}	96.85±0.57^{a}
真空超声同时处理	21.33±0.86^{a}	97.86±1.47^{a}
先超声后真空处理	40±2.45^{c}	97.99±1.03^{a}
先真空后超声处理	22.00±2.00^{a}	98.35±1.13^{a}

注：结果表示为平均值±标准差，每列中的上标的字母不同表示差异显著（P<0.05）。

2.5　真空联合超声对米饭老化特性的影响

糊化的米饭极易发生老化现象，米饭老化不仅会影响其后续的糖化分解和发酵过程，进而对黄酒的品质也会造成很大的影响。凝胶化淀粉的老化包括在短期老化过程中直链淀粉链的重新排序以及更长时间后支链淀粉的缓慢重组[21]。米饭煮熟后在几个小时内就完成了淀粉的短期老化，随着时间的延长支链淀粉开始重结晶，淀粉开始长期老化[22]。

不同处理米饭的老化特性如表 2 所示，与常规浸泡组相比，真空联合超声处理组米饭的峰值温度和终止温度均没有显著性差异；但是先超声后真空处理组的起始温度显著下降，说明该处理组淀粉重结晶晶体中的最弱微晶的有序性较差。老化焓是评价米饭老化特性的重要指标，本研究结果显示，先真空后超声处理能够显著（P<0.05）降低米饭的老化焓值，推测先真空后超声处理能抑制淀粉的有序重排，从而抑制米饭的回生程度，其中的原因有待进一步研究。

表 2　真空联合超声对米饭老化特性的影响

Table 2　Effect of vacuum combined with ultrasonic treatment on retrogradation properties of steamed rice

处理方法	起始温度/℃	峰值温度/℃	终止温度/℃	老化焓/(J/g)
常规浸泡	50.31±0.11^{c}	63.34±0.57^{a}	72.91±0.54^{a}	1.64±0.30^{bc}
真空处理	46.91±1.82^{ab}	62.72±1.39^{a}	72.74±0.85^{a}	1.81±0.09^{bc}
超声处理	48.03±0.90^{abc}	61.82±1.30^{a}	72.90±2.02^{a}	1.46±0.16^{ab}
真空超声同时处理	49.61±2.18^{bc}	64.19±1.99^{a}	73.85±0.68^{a}	1.66±0.15^{bc}
先超声后真空处理	45.74±1.57^{a}	61.74±0.79^{a}	74.08±0.63^{a}	2.12±0.51^{c}
先真空后超声处理	50.16±0.69c	60.38±5.18^{a}	75.21±1.22^{a}	1.03±0.09^{a}

注：结果表示为平均值±标准差，每列中的上标的字母不同表示差异显著（P<0.05）。

3　结　语

本研究结果表明，真空超声同时处理和先真空后超声处理均可以加速水分的渗透和扩散，提高大米的吸水速率，使大米的蒸饭时间缩短了 60%。与常规浸泡相比，真空超声同时处理后大米的硬度和米饭的回生特性没有显著差异；而先真空后超声处理后大米的硬度和米饭的老化焓值显著下降。说明先真空后超声处理对于改善大米吸水和蒸煮特性、抑制米饭老化具有一定作用，对改善黄酒的生产工艺具有一定的应用价值，但其作用机理、抑制米饭老化的原因有待于深入探究。此外，先真空后超声处理对大米的酿酒品质的影响还需进一步验证。

参考文献：

[1] 金昌海. 食品发酵与酿造[M]. 北京：中国轻工业出版社，2018：223-228.

[2] JIAO A Q，XU X M，JIN Z Y. Research progress on the brewing techniques of new-type rice wine[J]. **Food Chemistry**，2017，

215:508-515.
[3] CUI L,PAN Z L,YUE T L,et al. Effect of ultrasonic treatment of brown rice at different temperatures on cooking properties and quality[J]. **Cereal Chemistry**,2010,87(5):403-408.
[4] LI S,LUO Z,GUAN X,et al. Effect of ultrasonic treatment on the hydration and physicochemical properties of brewing rice[J]. **Journal of Cereal Science**,2019,87:78-84.
[5] BELLO M,TOLABA M,SUAREZ C. Hydration kinetics of rice kernels under vacuum and pressure[J]. **International Journal of Food Engineering**,2008,4(4):1-19.
[6] LOYPIMAI P,SITTISUANJIK K,MOONGNGARM A,et al. Influence of sodium chloride and vacuum impregnation on the quality and bioactive compounds of parboiled glutinous rice[J]. **Journal of Food Science and Technology**,2017,54(7):1990-1998.
[7] YILMAZ F M,BILEK S E. Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2018,48:509-516.
[8] MASHKOUR M,MAGHSOUDLOU Y,KASHANINEJAD M,et al. Effect of ultrasound pretreatment on iron fortification of potato using vacuum impregnation[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**,2018,42(5):1-10.
[9] GEKAWA T,TANAKA F,HAMANAKA D,et al. Incidence of open crack formation in short-grain polished rice during soaking in water at different temperatures[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,103(4):457-463.
[10] LI T,TU C H,RUI X,et al. Study of water dynamics in the soaking,steaming,and solid-state fermentation of glutinous rice by LF-NMR:a novel monitoring approach[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2015,63(12):61-70.
[11] XIAO G N,GONG J U,GE Q,et al. Effect of vacuum soaking on the properties of soybean (*Glycine max* L. Merr.)[J]. **International Journal of Food Engineering**,2015,11(1):151-155.
[12] 杨雅静. 电饭煲烹饪粳米饭品质的差异剖析及成因研究[D]. 无锡:江南大学,2018.
[13] TIAN Y Q,ZHAO J W,XIE Z J,et al. Effect of different pressure-soaking treatments on color,texture,morphology and retrogradation properties of cooked rice[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2014,55(1):368-373.
[14] TOMITA H,FUKUOKA M,TAKEMORI T,et al. Development of the visualization and quantification method of the rice soaking process by using the digital microscope[J]. **Journal of Food Engineering**,2018,243:33-38.
[15] FITO P,ANDRES A,CHIRALT A,et al. Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems[J]. **Journal of Food Engineering**,1996,27(3):229-240.
[16] TATIANE P,AUGUSTO-PEDRO-E D. Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**,2015,23:5-11.
[17] LV C,TIAN H F,ZHANG X,et al. LF-NMR analysis of the water mobility,state and distribution in sorbitol plasticized polyvinyl alcohol films[J]. **Polymer Testing**,2018,70:67-72.
[18] SRIKAEO K,RAHMAN M S. Proton relaxation of waxy and non-waxy rice by low field nuclear magnetic resonance(LF-NMR) to their glassy and rubbery states[J]. **Journal of Cereal Science**,2018,82:94-98.
[19] TANG H R,BRUN A,HILLS B. A proton NMR relaxation study of the gelatinisation and acid hydrolysis of native potato starch [J]. **Carbohydrate Polymers**,2001,46(1):7-18.
[20] JAGTAP P S,SUBRAMANIAN R,SINGH V. Influence of soaking on crushing strength of raw and parboiled rice[J]. **International Journal of Food Properties**,2008,11:127-136.
[21] MARIOTTI M,SINELLI N,CATENACCI F,et al. Retrogradation behaviour of milled and brown rice pastes during ageing[J]. **Journal of Cereal Science**,2008,49(2):171-177.
[22] 马晓军,王睿,耿敏,等. 即食方便米饭的老化机理及影响因素研究[J]. 食品与发酵工业,2008,247(7):37-40.