

超声处理对陈米中淀粉颗粒间解离及米胶质构的影响

朱世民, 郭玉宝*, 宋睿, 魏秦, 许子鑫
(安徽工程大学生物与食品工程学院 安徽芜湖 241000)

摘要 以新米和陈米相同粒径的米粉为试验材料,对比它们经超声处理后的粒度分布、显微形态、水结合能力及米胶质构的变化,考察超声处理对新米和陈米中淀粉颗粒间解离及米胶质构的影响,揭示陈化引起大米品质劣变的原因。结果表明:大米陈化后淀粉颗粒间难于解离,中间粒径的淀粉颗粒峰体积分数由 64.907% 降到 40.927%,水结合能力由 1.46 g/g 显著降到 1.35 g/g。超声处理可明显促进陈米中淀粉颗粒间的解离,显著提高水结合能力,进而改善陈米米胶的质构。陈米经超声处理 30 min,水结合能力提高到 1.44 g/g,达到新米水平,米胶质构与新米接近。陈米经超声处理 180 min,其粒度分布、水结合能力及米胶的黏性、弹性和咀嚼性均好于或达到新米水平。陈化引起淀粉颗粒间难于解离,降低了水结合能力,这可能是大米品质陈化劣变的原因之一。超声处理可明显改善陈米米胶的质构,研究结果对揭示稻米陈化机制以及调控大米品质具有重要意义。

关键词 大米; 陈化; 超声处理; 解离; 品质劣变

文章编号 1009-7848(2023)05-0031-08 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.05.004

大米作为世界上食用人口最多、种植历史最悠久的农作物产品^[1],其在加工储藏过程中极易受温度、湿度、微生物等各种因素的影响而发生品质劣变^[2]。其中陈化作为稻米储藏中最常见的劣变现象,其机理至今未明晰。

米制品品质受大米粉性质的影响,如蒸煮性质、糊化性质、胶凝性质及持水性,是大米粉市场应用中需考虑的重要因素^[3]。目前国外多是通过水热处理大米米粉^[4],加入功能性多糖和酶制剂等来改善米制品的品质^[5-6],而国内主要从改进生产工艺、延缓老化和提高营养性等方面入手^[7-8]。此外,大米粉的粒径对米制品的品质也有一定影响,降低粉体粒径可在一定程度上改善粉体的溶解性和消化性^[9]。魏春红等^[10]研究了不同粒径小米粉对馒头品质的影响,发现随着米粉粒径的减小,米粉持水力增大,弹性减小。潘思轶等^[11]研究发现,大米粉微细化后其理化性质普遍得到改善:糊化温度、透光率降低,热稳定性、冲调性能、溶解度、沉降性均有所提高。这些研究表明,粉体粒径对米制品品质有重要影响。

超声波是一种非热加工技术,被广泛应用于

各类食品原料的预处理和加工^[12]。白婷等^[13]和李薇等^[14]用超声处理青稞淀粉和豌豆淀粉,结果发现,随着超声功率的增加,峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度、回生值显著降低。Hu 等^[15]研究发现,玉米淀粉溶液经超声波处理后,糊化的峰值黏度与终值黏度显著低于处理前。另外,王琦等^[16]用超声处理糙米淀粉,结果发现,不同时间的超声处理均显著降低了峰值黏度、崩解值、最终黏度和回生值。以上有关超声处理对淀粉的影响研究均以分离的淀粉为对象,而对陈米中淀粉颗粒间解离的影响未见研究报道。

另外,Teo 等^[17]通过分离陈米中的淀粉,发现陈化对淀粉的糊化行为没有明显的影响,然而,分离过程可能破坏了淀粉颗粒间的结合。由此怀疑大米陈化后品质发生劣变,可能与淀粉颗粒间结合程度有关。本文以新米和陈米的相同粒径的米粉为试验材料,通过粒度分布、显微形态、水结合能力及米胶质构的变化研究超声处理对陈米中淀粉颗粒间解离的影响,揭示稻米陈化后品质劣变的原因及超声处理对陈米品质的改善作用,为阐明稻米陈化机理及调控米制品品质提供参考。

收稿日期: 2022-05-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31671784)

第一作者: 朱世民,男,硕士生

通信作者: 郭玉宝 E-mail: gyb346@ahpu.edu.cn

1 材料及方法

1.1 试验材料

粳型大米,初始含水量(14.30±0.01)%,购于

苏果超市。

1.2 仪器与设备

稻谷精米检测机(JGMJ8090),上海嘉定粮油仪器有限公司;质构仪(TA.new plus),上海保圣实业发展有限公司;激光粒度分析仪(MS2000),英国马尔文仪器有限公司;冷场发射扫描电子显微镜(S-4800),日本Hitachi公司;光学显微镜(LW200CA),上海测维光电技术有限公司;高速万能粉碎机(FW80),天津泰斯特仪器有限公司;真空冷冻干燥机(LGJ-12),北京松源华兴科技发展有限公司;超声清洗器(JK-100DB),合肥金尼克机械制造有限公司;低速离心机(L500),湖南湘仪实验仪器开发有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大米储藏和样品米粉的制备 将500 g大米分成2份,分别装入250 mL广口瓶中,密封,一份在4℃下保鲜贮存;另一份置37℃恒温培养箱中储藏12个月,获得陈米^[18-19]。取20 g米粒于粉碎机中粉碎20 s,先过150目筛,筛上物再过120目筛,取筛下物(100~125 μm),放入自封口袋中,4℃下贮存备用。

1.3.2 样品米粉的超声处理 称取10.000 g米粉放入烧杯中,加入50 mL蒸馏水,玻璃棒搅拌均匀后用保鲜膜密封。在室温(25℃)下浸泡10 min,然后在100 W下超声处理一定时间,温度设定在25℃,超声过程中多次换水以维持温度基本恒定,超声过程中每15 min搅拌1次。超声结束后,取少量超声处理的样品悬液,用于粒度分布测定和光学显微观察。将剩余的大部分米粉悬液4 000 r/min离心10 min,沉淀转移至培养皿中,用保鲜膜密封后冷冻24 h,取出,戳孔后冷冻干燥48 h。将干燥的样品用研钵研成粉末,用自封口袋密封,4℃保存备用。

1.3.3 粒度分布测定 取超声处理的样品悬液进行粒度分布测定。测定条件:分散剂为水,转速1 800 r/min,测定模式为手动,分散模式为多分散,每个样品平行测定5次。摇匀样品,用移液枪吸取后缓慢注入分散剂中,直至遮光度在10%~20%之间,测定粒度分布状况^[20]。

1.3.4 光镜形态观察 将超声处理后的悬液用滴管滴1滴于洁净载玻片上,加盖玻片,将0.02%碘

液从一侧滴入,用吸水纸从另一侧吸入,使碘液充分浸渍样品,染色2 min。再按上述方法用蒸馏水洗去多余碘液,反复多次直至出水为无色,置光学显微镜下观察。

1.3.5 扫描电镜观察 将超声处理并冻干的样品,用牙签挑取少量,均匀散落在样品台的导电胶上,吹去多余的样品粉末,喷金10 nm,在加速电压15 kV下用扫描电镜观察。

1.3.6 水结合能力的测定 水结合能力(Water binding capacity, WBC)^[21]为样品在低速离心下保留的水量。称取0.400 g超声处理后冻干的样品(m_1),加入预先恒重的离心管(m_2),再加入4 mL蒸馏水充分混合,在55℃下浸泡20 min,以2 000×g(5 700 r/min)离心10 min,轻轻倒出上层游离水,直至无水滴流出,称量沉淀和离心管总重(m_3)。WBC= $(m_3-m_2-m_1)/m_1$,以每克样品保留水的质量(g)表示,平行测定3次,取平均值。

1.3.7 米胶质构的测定 参考文献^[22]方法并修改。取超声处理并冻干的样品,按料液比1:5配制米粉悬液,在95℃加热15 min,转移至直径25 mm的小铝盒中摊平,冷却至室温后4℃下冷却12 h,采用质构仪以全质构分析模式(Texture profile analysis, TPA)测定米胶质构,平行测定3次,取均值。测定条件:5 kgf传感器,TA/0.5凝胶探头,探头测试前下压速度、测试速度、测试后上升速度均为1.0 mm/s,触发力5 g,间隔时间4 s,压缩至样品高度的50%,样品测定温度25℃。

1.3.8 数据处理 数据采用SAS 8.01进行ANOVA单因素方差分析及邓肯多重比较(Duncan's multiple range test, $P<0.05$),结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 超声处理对粒度分布的影响

超声处理对粒度分布的影响见图1,显示3个粒径峰。组织形态学研究结果表明,大米胚乳细胞的大小在30~70 μm^[23-24]。淀粉颗粒是大米胚乳组织的基本组成实体,淀粉颗粒包括单粒和复粒,大小分别为3~8 μm^[25]和7~25 μm^[26]。每个淀粉复粒包含多个淀粉单粒。大米胚乳中的蛋白质主要以蛋白体(Protein body, PB)形式存在^[27],PB-I为

0.5~2.0 μm , PB-II 为 2.0~3.0 μm ^[28]。考虑到淀粉在室温下水中略有溶胀, 图 1 中的 3 个粒径峰从大到小分别归属于胚乳细胞峰、淀粉颗粒峰和蛋白体峰。由图 1a 可看出, 未超声处理时, 陈米的中粒径峰远小于新米, 大粒径峰远大于新米; 陈米的中粒径峰比大粒径峰小, 这与新米的刚好相反, 这些都表明陈化导致胚乳细胞难于解离分散成淀粉颗粒。超声处理 30 min 和 60 min 后(图 1b~1c), 陈米和新米的中粒径峰均增大, 陈米的中粒径峰仍低于相同处理的新米; 当超声处理 180 min 后(图 1d), 陈米的中粒径峰反而超过相同处理的新米

(表 1), 表明长时间超声处理后陈米中淀粉颗粒的解离程度可以超过新米, 说明超声处理可显著促进陈米中淀粉颗粒间的解离分散。超声处理对新米淀粉颗粒的解离也有促进作用, 然而, 超声前新米中的淀粉颗粒间解离程度已较高, 且对超声促分散作用具有较强的耐受性, 因此其变化幅度小于陈米。

从表 1 中小粒径峰体积分数可以看出, 超声处理对蛋白体与淀粉颗粒间解离的影响不具有单调性, 随着超声处理时间的延长, 新米中二者间的解离先增大后减小, 而陈米中是先减小后增大, 蛋

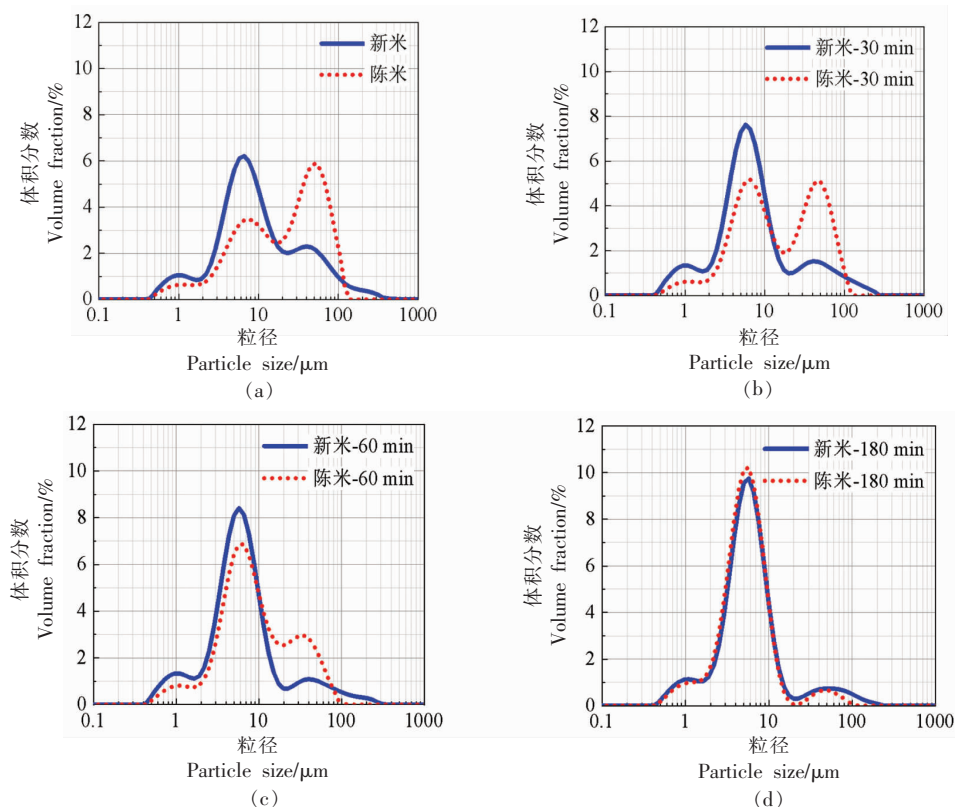


图 1 超声处理对米粉粒度分布的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic treatment on the particle size distribution of rice flour

表 1 超声处理对米粉粒度峰体积分数的影响

Table 1 Effect of ultrasonic treatment on the particle size peak volume fraction of rice flour

超声 时间/min	大粒径峰(50 μm)体积分数/%		中间粒径峰(7 μm)体积分数/%		小粒径峰(1 μm)体积分数/%	
	新米	陈米	新米	陈米	新米	陈米
0	27.852 \pm 0.418 ^{ad}	54.564 \pm 0.215 ^{ab}	64.907 \pm 0.376 ^{da}	40.927 \pm 0.196 ^{dc}	7.242 \pm 0.041 ^{be}	4.510 \pm 0.020 ^{df}
30	18.352 \pm 1.281 ^{bd}	43.637 \pm 0.119 ^{bc}	72.472 \pm 0.615 ^{ca}	52.206 \pm 0.109 ^{cb}	9.175 \pm 0.714 ^{de}	4.157 \pm 0.011 ^{df}
60	12.874 \pm 0.370 ^{cd}	25.111 \pm 0.134 ^{cc}	78.077 \pm 0.331 ^{ba}	69.551 \pm 0.127 ^{bb}	9.049 \pm 0.049 ^{de}	5.338 \pm 0.011 ^{bf}
180	8.409 \pm 0.170 ^{dc}	4.539 \pm 0.130 ^{df}	84.137 \pm 0.155 ^{ab}	89.013 \pm 0.133 ^{aa}	7.454 \pm 0.020 ^{cd}	6.448 \pm 0.005 ^{ae}

注: 结果为平均值 \pm 标准差; 同一列不同小写字母及同一行不同大写字母表示样品间差异显著($P < 0.05$)。

白体分离与淀粉颗粒解离之间不具有正相关性。相同处理时间下,新米的小粒径峰体积显著大于陈米的,说明陈米中蛋白体比新米中的蛋白体更难从淀粉颗粒上脱离下来。从表1还可以看出,新米除了易于解离成胚乳细胞外,淀粉颗粒间同样容易解离。陈米仅胚乳细胞间容易解离,而淀粉颗粒间难于解离,表现为陈米的胚乳细胞峰高于淀粉颗粒峰,说明陈化对细胞间解离的影响不大,主要影响淀粉颗粒间结合的紧密程度,这可为阐明稻米陈化机制提供新的思路。

2.2 超声处理对淀粉颗粒解离光学显微形态的影响

超声处理前,新米粒子溶胀程度大于陈米,边

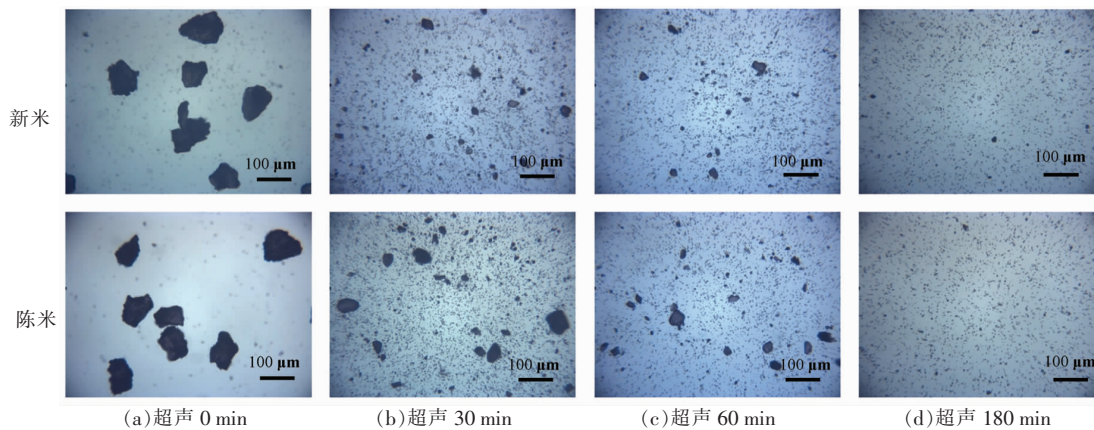


图2 超声处理对淀粉颗粒解离光学显微形态的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic treatment on disassociation of starch granules of rice flour by light microscopic observation

2.3 超声处理对淀粉颗粒解离扫描电镜形态的影响

超声处理对淀粉颗粒解离的影响见图3。超声处理前,新米中可见部分淀粉颗粒以散落状态依附于米粉粒子表面(图3a)。米粉粒子表面凹凸不平,可见多个淀粉颗粒脱落坑,表明新米中淀粉颗粒间易于解离,而陈米中未见散落的淀粉颗粒,米粉粒子表面大部分相对平整,颗粒间结合较为紧密,可见少量裂纹(图3a)。超声处理30 min后,新米米粉粒子可见更多的淀粉颗粒解离,且淀粉单粒较多(图3b);而陈米米粉颗粒表面仅可见少量淀粉单粒,一些复粒间虽出现裂纹,但未脱离,大部分单粒间结合紧密(图3b)。超声处理60 min后,新米中所剩大颗粒已很少,大部分呈淀粉单粒

缘呈锯齿状,解离出来的小颗粒较多(图2a)。陈米粒子溶胀较小,边缘较平滑整齐,解离出来的小颗粒较少(图2a),表明陈米比新米中的淀粉颗粒更难于解离。超声处理30 min后,新米粒子粒径明显减小,解离出大量小颗粒,所剩的大颗粒数量明显减少(图2b);陈米粒子粒径也明显减小,小颗粒明显增多,而大颗粒比新米中的更大、数量更多(图2b)。超声处理60 min后,新米和陈米中所剩大颗粒数量进一步减少,而陈米中的大粒子数量更多、更大(图2c)。超声处理180 min后,新米和陈米中所剩大颗粒均已很少,大部分解离成小颗粒(图2d)。

形式存在(图3c);陈米中可见淀粉单粒也明显增多,虽仍以大颗粒为主,但大颗粒中的淀粉颗粒间变得较为疏松(图3c)。超声处理180 min后,新米和陈米中大部分变为淀粉单粒(图3d)。

2.4 超声处理对米粉水结合能力的影响

超声处理对米粉水结合能力的影响见图4。淀粉吸水性的强、弱代表了淀粉颗粒结构的致密程度,吸水性越低,颗粒的致密程度越高^[29]。未超声时,新米米粉的水结合能力明显高于陈米。超声处理30 min后,新米和陈米的水结合能力均有提高,陈米提高更加明显,而且提高到与未处理新米相近的水平。超声处理超过60 min后,新米与陈米的水结合能力间无显著差异。魏春红等^[10]研究也表明,米粉粒径越小,淀粉颗粒吸水充分,水结

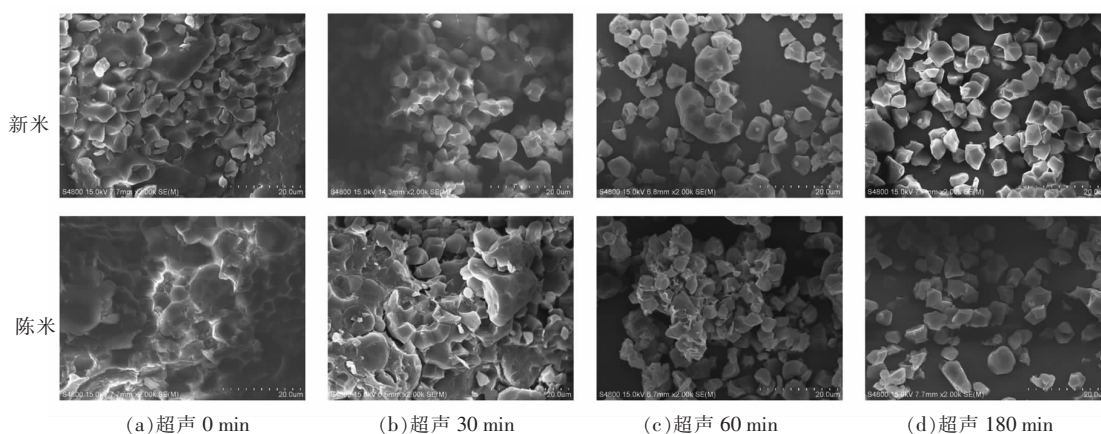


图 3 超声处理对米粉扫描电镜显微形态的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic treatment on disassociation of starch granules of rice flour by scanning electron microscopic observation

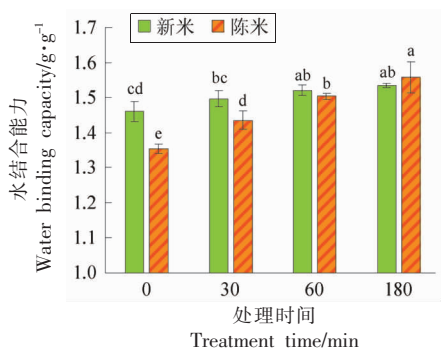


图 4 超声处理对米粉水结合能力的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment on water binding capacity of rice flour

合能力越高,与本研究结果一致。对比超声处理对新米和陈米粒度分布变化的影响,陈米水结合能力的改善所需超声时间 60 min,短于改善粒度分布变化所需超声时间(180 min),即:当陈米的水

结合能力达到新米的水平时其解离程度仍低于新米,提示陈米比新米的淀粉颗粒内部结构更疏松。

2.5 超声处理对米胶质构的影响

大米陈化后,食用品质发生劣变,体现为质构和黏度的变化。为了说明陈米中淀粉颗粒解离对其食用品质的影响,考察超声处理促进陈米中淀粉颗粒解离后米胶质构的变化,揭示大米陈化劣变的微观机制。由表 2 可知,未超声处理时,陈米米胶的 5 个质构参数均显著高于新米,更高的硬度和咀嚼性是陈化的典型特征^[30-31]。超声处理 30 min 后,陈米米胶的质构参数值比超声前明显降低,达到未处理新米米胶的水平,显示出良好的改善效果,水结合能力的变化支持了这一结果。除胶着性持平外,其它 4 个质构参数,超声处理 30 min 后的陈米米胶仍显著高于相同时间超声处理

表 2 超声处理对米胶质构的影响

Table 2 Effect of ultrasonic treatment on gel texture of rice flour

超声时间/min		硬度/N	黏性/N	弹性	咀嚼性/N	胶着性/N
0	新	1.527 ± 0.084 ^{bc}	0.393 ± 0.031 ^b	1.014 ± 0.002 ^b	1.356 ± 0.081 ^b	1.338 ± 0.081 ^{bc}
	陈	1.870 ± 0.016 ^a	0.568 ± 0.064 ^a	1.372 ± 0.128 ^a	2.121 ± 0.218 ^a	1.547 ± 0.070 ^a
30	新	1.492 ± 0.021 ^c	0.294 ± 0.298 ^{cd}	0.818 ± 0.001 ^c	1.087 ± 0.066 ^c	1.329 ± 0.079 ^{bc}
	陈	1.634 ± 0.137 ^b	0.381 ± 0.016 ^b	1.000 ± 0.078 ^b	1.426 ± 0.141 ^b	1.428 ± 0.120 ^b
60	新	1.353 ± 0.083 ^d	0.265 ± 0.009 ^d	0.824 ± 0.007 ^c	1.018 ± 0.071 ^c	1.235 ± 0.089 ^c
	陈	1.366 ± 0.018 ^d	0.337 ± 0.022 ^{bc}	0.891 ± 0.014 ^c	1.102 ± 0.024 ^c	1.236 ± 0.020 ^c
180	新	0.463 ± 0.040 ^e	0.091 ± 0.003 ^e	0.682 ± 0.027 ^d	0.252 ± 0.050 ^d	0.368 ± 0.065 ^d
	陈	0.262 ± 0.023 ^f	0.054 ± 0.005 ^e	0.665 ± 0.019 ^d	0.142 ± 0.010 ^d	0.211 ± 0.016 ^c

注:同一列不同小写字母表示样品间差异显著($P < 0.05$)。

的新米。当超声处理 60 min 后,陈米米胶除黏性明显更高外,其它 4 个质构参数均与相同处理的新米持平,这与水结合能力的变化趋势相一致。当超声处理 180 min 后,陈米米胶与新米米胶的黏性之间也变得无显著差异。除弹性和咀嚼性仍持平外,陈米米胶的硬度和胶着性反而明显低于相同处理的新米米胶,说明陈米米胶的黏性是质构参数中最难改善的。对于整粒米形式的米饭来说,大米陈化后硬度增加,其黏性是降低的^[32]。对于米胶来说,陈化后硬度和黏性均是增加的^[33],可能是由于陈米米胶中的米粉颗粒较大而间隙空间较小,单位颗粒表面固形物相对较多,或者陈米中解离出来的少量淀粉颗粒更易破裂所致。综上,超声处理促进了陈米中淀粉颗粒间的解离分散,提高了水结合能力,进而可明显改善米胶的质构。

3 结论

陈化引起大米品质的明显劣变,其微观机制鲜有报道。本文以新米和陈米的相同粒径米粉为试材,通过超声处理研究淀粉颗粒间解离对米胶质构的影响。结果表明,未超声处理时,陈米胚乳中的淀粉颗粒间难解离,水结合能力降低,米胶质构参数值明显较高;超声处理后,可有效促进陈米中淀粉颗粒间的解离,提高水结合能力,进而明显改善米胶的质构。陈米超声处理 30 min 后,其米胶质构就达到未处理新米的水平,水结合能力的变化能支持这一结果。超声处理 180 min 后,陈米与新米粒度分布的中粒径峰——淀粉颗粒峰的体积分数间无显著差异,水结合能力间也无显著差异,质构参数中最难改善的黏性也达到同一水平,而且硬度和胶着性比相同处理的新米更低。上述结果说明,淀粉颗粒的解离程度明显改变米胶的质构,水结合能力起到关键作用。大米陈化的微观本质可能是淀粉颗粒间难于解离,而超声处理可有效促进陈米中淀粉颗粒间的解离,进而明显改善米胶的质构。本研究结果对于揭示大米的陈化机理及调控其食用品质具有重要的意义。

参 考 文 献

[1] 张群. 稻米营养制品加工关键技术[J]. 食品与生物技

术学报, 2015, 34(3): 336.

ZHANG Q. The key technology of rice nutritional products processing[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(3): 336.

[2] 龙训锋, 李刚. 浅谈稻米加工企业的稻谷储藏技术[J]. 粮食加工, 2017, 42(2): 34-37.

LONG X F, LI G. Talking about the rice storage technology of rice processing enterprises [J]. Grain Processing, 2017, 42(2): 34-37.

[3] LIKITWATTANASADE T, HONGSPRABHAS P. Effect of storage proteins on pasting properties and microstructure of Thai rice[J]. Food Research International, 2010, 43(5): 1402-1409.

[4] PUNCHA-ARNON S, UTTAPAP D. Rice starch vs. rice flour: Differences in their properties when modified by heat-moisture treatment [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 91(1): 85-91.

[5] HEO S, JEON S, LEE S. Utilization of *Lentinus edodes* mushroom β -glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 55(2): 627-631.

[6] GUJRAL H S, ROSELL C M. Functionality of rice flour modified with a microbial transglutaminase [J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39(2): 225-230.

[7] 汪霞丽, 沈娜, 李亦蔚, 等. 方便湿米粉的加工工艺及抗老化研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 203-206.

WANG X L, SHEN N, LI Y W, et al. Study on processing technology and anti-retrogradation of instant wet rice noodles [J]. Food and Machinery, 2012, 28(4): 203-206.

[8] 易翠平, 周慧, 佟立涛. 鲜米粉加工过程中的发酵工艺研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 223-225, 244.

YI C P, ZHOU H, TONG L T. Advances on fermentation in rice noodle production [J]. Food and Machinery, 2013, 29(5): 223-225, 244.

[9] 杨璐. 超微粉碎对燕麦粉品质影响及体外模拟消化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.

YANG L. Effects of ultrafine pulverization on quality and *in vitro* simulated digestion of oat flour[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.

[10] 魏春红, 李春辉, 鹿保鑫, 等. 不同粒度小米粉性质及对馒头品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(7): 65-68.

WEI C H, LI C H, LU B X, et al. Characteristics

- of millet flour with different size and its influence on the quality of steamed bread[J]. *Cereals and Oils*, 2017, 30(7): 65–68.
- [11] 潘思轶, 王可兴, 刘强. 不同粒度超微粉碎米粉理化特性研究[J]. *食品科学*, 2004, 25(5): 1–4.
PAN S Y, WANG K X, LIU Q. Study on physical and chemical properties of different sizes rice powder[J]. *Food Science*, 2004, 25(5): 1–4.
- [12] 冯业坤, 马金满. 超声波技术在食品研究开发中的应用现状与展望[J]. *食品安全导刊*, 2021(9): 169–171.
FENG Y K, MA J M. Application status and prospect of ultrasonic technology in food research and development[J]. *China Food Safety*, 2021(9): 169–171.
- [13] 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): 1–10.
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): 1–10.
- [14] 李薇, 郑炯, 陈映衡, 等. 超声波处理对豌豆淀粉糊化、流变及质构特性的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(5): 32–37.
LI W, ZHENG J, CHEN Y H, et al. Effect of ultrasound treatment on the pasting, rheological and textural properties of pea starch[J]. *Food and Machinery*, 2018, 34(5): 32–37.
- [15] HU A, LI L, ZHENG J, et al. Different-frequency ultrasonic effects on properties and structure of corn starch[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(14): 1–6.
- [16] 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*, 2021, 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*, 2021, 37(1): 60–65.
- [17] TEO C H, KARIM A A, CHEAH P B, et al. On the roles of protein and starch in the aging of non-waxy rice flour[J]. *Food Chemistry*, 2000, 69(3): 229–236.
- [18] ZHOU Z, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Effect of storage temperature on rice thermal properties[J]. *Food Research International*, 2010, 43(3): 709–715.
- [19] 宁俊帆, 郭玉宝, 宋睿, 等. 稻米陈化中谷蛋白变化光谱解析及其对功能性质的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(11): 3431–3437.
NING J F, GU Y B, SONG R, et al. Spectral analysis of gluten changes during rice aging and its effect on functional properties[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(11): 3431–3437.
- [20] TECANTE A, DOUBLIER J L. Steady flow and viscoelastic behavior of crosslinked waxy corn starch- κ -carrageenan pastes and gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1999, 40(3): 221–231.
- [21] ESTHER D, GOMEZ M, ROSELL C M. Particle size distribution of rice flour affecting the starch enzymatic hydrolysis and hydration properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1): 421–427.
- [22] 豁银强, 袁佰华, 汤尚文, 等. 大米谷蛋白对大米淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(6): 1–5.
HUO Y Q, YUAN B H, TANG S W, et al. Effect of rice gluten on gelatinization and gel properties of rice starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(6): 1–5.
- [23] MATSUSHIMA R, MAEKAWA M, FUJITA N, et al. A rapid, direct observation method to isolate mutants with defects in starch grain morphology in rice[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2010, 51(5): 728–741.
- [24] PAN T, ZHAO L, LIN L, et al. Changes in kernel morphology and starch properties of high-amylose brown rice during the cooking process[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 66(5): 227–236.
- [25] WHISTLER R L. *Starch: Chemistry and technology* [M]. Orlando: Academic Press, 1984: 153–182.
- [26] HAYAKAWA T, SEO S W, IGAUE I. Electron microscopic observation of rice grain[J]. *Journal of the Japanese Society of Starch Science*, 1980, 27(3): 173–179.
- [27] 朱斌昕. 大米蛋白——大米中的含量、品质及分布[J]. *无锡轻工业学院学报*, 1986, 5(3): 70–76.
ZHU B X. Rice protein—content, quality and distribution in rice[J]. *Journal of Wuxi Institute of Light Industry*, 1986, 5(3): 70–76.
- [28] COLLIER K, BARBER L, LOTT J N A. A study

- of indigestible protein fractions of rice (*Oryza sativa* L.) endosperm fed to mice (*Mus musculus*) and sheep (*Ovis musimon*): A qualitative and quantitative analysis[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 27(1): 95-101.
- [29] 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 H F, CHEN Y M. A study on the changes of starch properties during rice aging process [J]. Food and Feed Industry, 2001(11): 12-14.
- [30] 赵学伟, 卞科, 王金水. 陈米质构特性变化机理研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2001, 22(2): 5-10.
ZHAO X W, BIAN K, WANG J S. Development in studies on mechanisms of texture changes of stored cooked rice[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2001, 22(2): 5-10.
- [31] SODHI N S, SINGH N, ARORA M, et al. Changes in physico-chemical, thermal, cooking and textural properties of rice during aging[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 27(5): 387-400.
- [32] DIAO M, GUO Y, TIAN W, et al. Restoring fresh texture in cooked aged rice with reducing agents[J]. Food Research International, 2019, 121(7): 84-90.
- [33] WU P, LI C, BAI Y, 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.

Effects of Ultrasonic Treatment on Disassociation of Starch Granules and Gel Texture of Aged Rice

Zhu Shimin, Guo Yubao*, Song Rui, Wei Qin, Xu Zixin

(School of Biological and Food Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui)

Abstract Taking the rice flour with the same particle size of fresh and aged rice as research materials, the changes of particle size distribution, microstructure, water binding capacity and rice gel texture after ultrasonic treatment were compared, in order that the effects of ultrasonic treatment on the dissociation between starch granules and rice gel texture of fresh and aged rice were investigated, revealing the underlying reasons of quality deterioration caused by rice aging. The results showed that the starch granules were difficult to dissociate after rice aging, the peak volume fraction of starch granules with intermediate particle size decreased from 64.907% to 40.927%, and the water binding capacity decreased significantly from 1.46 g/g to 1.35 g/g. Ultrasonic treatment could significantly promote the dissociation between starch granules in aged rice, significantly increase the water binding ability, and then improve the gel texture of aged rice. After ultrasonic treatment for 30 min, the water binding capacity of aged rice could be improved to 1.44 g/g, approaching to the level of fresh rice, and the gel texture of aged rice was close to that of fresh rice. After ultrasonic treatment for 180 min, for the aged rice, its particle size distribution, water binding capacity, stickiness, elasticity and chewability of rice gel were better than or reached the level of fresh rice. Rice aging caused the difficulty of dissociation between starch granules and reduces the water binding capacity, which could be one of the underlying reasons for the quality deterioration of rice aging. Ultrasonic treatment could significantly improve the gel texture of aged rice, which was of great significance to reveal the aging mechanism of rice storage and regulate rice quality.

Keywords rice; aging; ultrasonic treatment; disassociation; quality deterioration