

蒸谷米加工工艺及品质的研究进展

闫舒,李洪岩*,王静

(北京工商大学 食品与健康学院 中加食品营养与健康联合实验室,北京 100048)

摘要:蒸谷米是以稻谷或糙米为原料,经过浸泡、蒸煮和干燥等一系列水热处理后,再经常规碾米工序得到的一类大米产品。蒸谷米在制备过程中发生水合-脱水、淀粉糊化和老化等系列理化变化,赋予其高营养、耐储存等特点,是一种营养健康的主食产品。该文综述蒸谷米加工过程及发生的理化变化,阐明加工和理化变化对蒸谷米产品品质的影响,以期作为蒸谷米加工技术的改进以及产品品质的改善提供理论指导。

关键词:蒸谷米;加工;理化变化;品质;淀粉;质构

Research Progress on Processing Technology and Quality of Parboiled Rice

YAN Shu, LI Hong-yan*, WANG Jing

(China-Canada Joint Lab of Food Nutrition and Health (Beijing), School of Food and Health, Beijing Technology & Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Parboiled rice is produced from paddy or brown rice after a series of hydrothermal treatments, such as soaking, steaming, and drying, and through conventional milling steps. During its preparation process, parboiled rice undergoes physical and chemical changes, such as hydration, dehydration, starch gelatinization, and starch aging, enhancing its nutritional value and storage resistance. Parboiled rice is a nutritionally healthy staple food. The effects of processing and physical and chemical changes on the quality of parboiled rice products were described to provide a theoretical reference for improving the processing technology and product quality of parboiled rice.

Key words: parboiled rice; processing; physical and chemical changes; quality; starch; texture

引文格式:

闫舒,李洪岩,王静. 蒸谷米加工工艺及品质的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(18): 166-174.

YAN Shu, LI Hongyan, WANG Jing. Research Progress on Processing Technology and Quality of Parboiled Rice[J]. Food Research and Development, 2021, 42(18): 166-174.

蒸谷米是以稻谷或糙米为原料,经过浸泡、蒸煮、干燥、碾米等过程得到的一种不同于普通精白米的大米产品。相比于精白米,蒸谷米具有更低的碎米率和更长的保质期,营养品质也高于精白米,因此,随着我国居民饮食结构和习惯的转变,蒸谷米更加符合当下健康饮食发展的需求。

蒸谷米虽然具有良好的营养、储存品质,但长期以来由于口感与国内大众的口味不符,我国的蒸谷米

产品主要用于出口,在国内市场上,销量较少且产品类型单一^[1]。随着居民健康饮食和膳食结构的转变,蒸谷米再次进入人们的视野并逐渐被消费者所青睐,国内关于蒸谷米加工方式、理化性质等方面的基础研究也越来越多。本文旨在概述蒸谷米制备过程中发生的物理、化学和生物变化,以及对加工、储存和营养品质影响的评价,以期作为蒸谷米的研究与加工技术的改进提供理论参考。

基金项目:国家自然科学基金(31901729);国家重点研发计划(2018YFD0400600)

作者简介:闫舒(1997—),女(汉),硕士研究生,研究方向:蒸谷米质构品质改良。

*通信作者:李洪岩,男,副教授,研究方向:淀粉基谷物食品加工基础。

1 蒸谷米的加工工艺

蒸谷米的加工工艺如图1所示。

与精白米的生产相比,蒸谷米的生产过程涉及水热处理,包括浸泡、蒸煮和干燥工艺。稻谷通常被选为

蒸谷米制作的原料,但是稻壳导热性差,导致加工时间长、能源消耗大,所以近年来以糙米为原料制备蒸谷米成为一个有吸引力的选择。

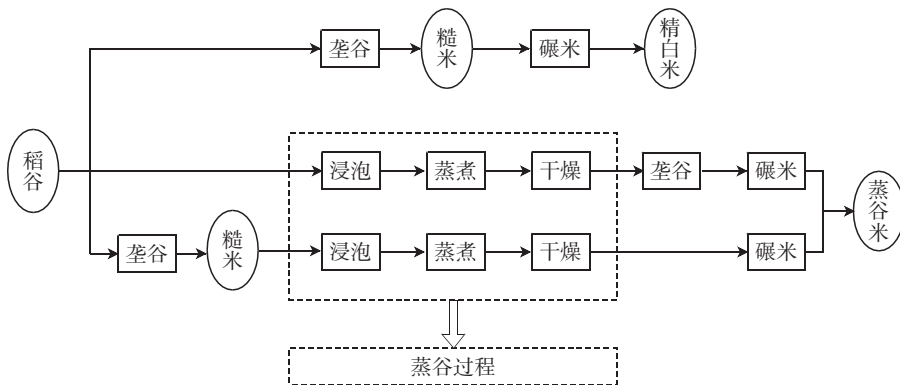


图1 蒸谷米的一般加工工艺

Fig. 1 General processing of parboiled rice

1.1 浸泡

浸泡是对稻谷或糙米进行蒸谷处理的第一步。经过清理、分级之后,将原料浸泡在过量的水中,通过不同的温度和时间组合,使水分进入颗粒内部。对稻谷或糙米进行浸泡,是为了让颗粒内部被充分水合,有利于之后的淀粉糊化。浸泡对最终蒸谷米产品的品质具有重要影响。水分的吸收导致颗粒内部产生裂缝,当颗粒吸收更多水分时,这些裂缝会因淀粉膨胀而消失。浸泡温度从15℃升高至55℃时,由于水合速率加快,使得颗粒内外水分梯度降低增快,最终产品的裂隙率降低^[2]。高温浸泡可以缩短浸泡时间,并抑制发酵和酶促反应,消除了环境因素对浸泡的不利影响^[3]。浸泡过程温度低、时间短,导致浸泡后的颗粒内部含水量过低,在后续蒸煮过程中淀粉无法充分糊化,从而导致最终的产品存在白芯现象。白芯和裂缝的存在使碾米过程中米粒容易破碎,进而导致大米得率下降。此外,与常压浸泡相比,增加压力可以有效减少时间与能耗,从而降低成本。

1.2 蒸煮

蒸煮是影响蒸谷米品质的关键过程,淀粉糊化是这一过程中重要的物理变化。蒸煮通常在103℃~134℃的温度范围内进行,相当于大约101.3 kPa~303.9 kPa的压力。常见的蒸煮方式包括蒸汽蒸煮、微波蒸煮以及高压蒸煮等。蒸煮处理通过影响淀粉的糊化程度从而影响蒸谷米产品的品质,比如颗粒在碾米过程中的碎米率。研究者通过将蒸谷米的蒸煮时间从2 min 延长至10 min 时,发现其糊化度从46.8%增加到

77.9%,而整精米率从64.8%先增加至67.1%,再降低至65.0%^[4]。适当的蒸煮时间可以降低蒸谷米的碎米率,但时间过长,会造成蒸煮过程中颗粒破裂变形,碎米率反而增加。此外,Patindol 等^[5]发现,延长蒸煮时间可以降低蒸谷米的垩白度和米饭的黏度,增加其硬度。

1.3 干燥

干燥步骤是将颗粒内的水分降低至安全的水分含量(14%)以下,有利于之后的砻谷或碾米步骤^[6]。在干燥过程中若水分含量降低速度过快,容易造成颗粒爆腰率增加,降低碾米得率,因此在工业中,蒸谷米的干燥过程多为多阶段干燥^[7]。初始阶段中,蒸谷米中的水分被大量除去,此时颗粒的含水量约为18%~28%;接着使用连续或间歇干燥的方法,使颗粒达到安全的水分含量^[8]。常见的干燥方式包括低温干燥、微波干燥等方式。刘学武等^[9]对不同微波干燥时间下的蒸谷米的复水率进行研究发现,当干燥时间为6 min 时蒸谷米的复水率最大,而随着干燥时间增加复水率降低,推测是由于微波干燥时间过长,致使颗粒内淀粉发生变性或老化,使其吸水能力下降。程科等^[10]研究发现,相比较于微波、热风 and 分段干燥,低温干燥在碎米率、蛋白质含量和储藏效果方面表现更优。任广跃等^[11]认为,在初始快速干燥过程后加入缓苏阶段,有利于内部残余水分的向外扩散,从而有效降低水分梯度。

近年来,为改善蒸谷米品质以及节约能源,研究人员尝试使用新技术对传统蒸谷米加工工艺进行改进,如表1所示。

表1 蒸谷米制备过程中的新工艺及对品质的影响
Table 1 New technology in preparation of parboiled rice and its influence on quality

蒸谷过程	新工艺	对蒸谷米品质的影响	参考文献
浸泡	超高压	有利于浸泡后颗粒中的水分均匀分布,有效消除产品中的白芯现象	[12]
	超高压	在压力 150 MPa 和浸泡时间 7 min 的条件下,整精米率高达 71.38%	[13]
	微波辐照	对蒸谷米的加工品质影响不显著,但米饭的硬度增加,黏度降低	[14]
	柠檬酸浸泡	蒸谷米中钠、镁元素含量增加,米饭硬度降低,感官评价分数增加	[15]
蒸煮	微波辐照	节省浸泡时间,降低颗粒白度,并且可降低浸泡过程中的固体析出	[16]
	微波辐照	蒸谷米的蒸煮时间降低,蛋白质的溶解度和白度增加	[17]
	高压蒸煮	蒸谷米中的 γ -谷维素、 α -生育三烯酚的含量增加, α -生育酚、 γ -生育酚和多不饱和脂肪酸降低	[18]
干燥	过热蒸汽法	整精米率增加,垩白度降低,但颜色相较于传统蒸谷米更深	[19]
	红外干燥	蒸谷米的整精米率高,但所需的加工时间长	[20]
	微波干燥	蒸谷米颗粒的裂纹率低,米饭的膨胀率高	[10]
	微波辅助热空气流化床	稻谷在干燥床上被均匀地加热和干燥,简化蒸谷米的生产过程,但显著影响产品的颜色	[21]

2 蒸谷过程中主要的理化变化

在蒸谷过程中,稻谷或糙米经过了水合和淀粉糊化,使大米的物理、化学和功能特性发生了一些变化。了解水热处理阶段涉及的理化变化对于提高蒸谷米的品质来说至关重要。

2.1 水合作用

水合作用主要发生在原料(稻谷或糙米)浸泡的阶段。水合作用通过影响浸泡后颗粒的含水量和水分分布状态,从而影响淀粉糊化等变化,因此,水合作用很大程度上决定了最终产物的品质。在这个步骤中,温度和时间的组合应足以使颗粒达到至少 30% 的水分含量,且保证这一过程中谷物不会发生降解、破裂等情况^[21]。水在米粒中的扩散速率与胚乳中淀粉颗粒间孔的可利用性和组分的亲水性有关。孔的数目取决于淀粉颗粒的微观结构、形态和交联密度。根据 Sridhar 等^[23]的研究,水合作用的温度越低,水的扩散就越慢,所需要的浸泡时间越久。Miah 等^[24]发现使用热水浸泡稻谷或糙米可以节省加工时间,提高蒸谷效率并提高产品品质。温度的升高会增加水分子的运动,使其渗透谷物并容易与碳水化合物和蛋白质等成分结合^[22]。Xu 等^[12]通过核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, NMR)发现,浸泡后的颗粒辅以超高压处理有利于水分在颗粒中的均匀分布,可有效减少白芯和裂缝的产生。

2.2 淀粉糊化

颗粒水合后,通常将水滤干,使用蒸汽、微波等蒸煮方式使颗粒内的淀粉发生糊化。当膨胀的淀粉颗粒处于或高于淀粉糊化温度时,其晶体结构将不可逆地被破坏,具体表现为双折射消失和结晶熔化^[25]。通过淀粉糊化可提升谷物品质,例如提高整精米率(增加颗

粒硬度,减少碎谷粒的数量),保留维生素和矿物质等。随着颗粒浸泡之后的含水量和蒸煮过程中加热程度的增加,淀粉糊化程度可增加至 100%。颗粒的糊化温度受稻谷品种的影响,不同品种的混合稻谷对碎米率和大米垩白度具有显著影响,Basutkar 等^[26]认为混合稻谷中的淀粉糊化温度的不同导致了产品品质不一致。浸泡之后颗粒内的含水量也会对淀粉的糊化温度有一定的影响,含水量越低,达到糊化所需要的温度越高。何易雯等^[27]认为淀粉的糊化特性与大米食用品质存在相关性,而蒸谷米淀粉在再糊化过程中崩解值降低,说明蒸谷米中的淀粉经过预先糊化后,其性质比较稳定,抗剪切能力增加。

2.3 淀粉老化

冷却干燥阶段发生淀粉老化,也是蒸谷米制备过程中发生的重要变化。糊化淀粉经过老化所形成的晶体是决定蒸谷米食用品质的重要因素。淀粉经过糊化,A 型结晶减少或者完全消失,而在冷却干燥过程中,糊化的淀粉会重结晶为 A 型结晶或者 B 型结晶^[28]。蒸谷米中剩余的 A 型结晶取决于蒸煮的程度,而淀粉的回生程度取决于干燥过程中的水分含量和温度。Sittipod 等^[25]通过分析蒸谷米的热特性发现,经过一个月的贮藏,蒸谷米中不仅发生了淀粉的回生,还有直链淀粉-脂质复合物的形成。如若淀粉在脂肪酸或者长链醇的存在下发生重结晶,就会形成 V 型结晶。淀粉的糊化温度和蒸煮条件会影响直链淀粉-脂质复合物形成的类型和水平,此外在冷却干燥过程中,随着水分的损失,也会加强直链淀粉-脂质复合物的形成。

2.4 脱水作用

当低于糊化温度时,普通稻谷中的裂缝和淀粉的微观结构主导水分扩散。而蒸谷米中由于发生淀粉糊

化,水分占据了内部空隙,并与淀粉链结合,导致自由水较少。蒸煮过的稻谷或糙米,其材料特性发生变化,其脱水作用不同于未糊化的颗粒,水分在糊化淀粉中的扩散系数($2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)小于在未糊化淀粉中的扩散系数($5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)^[29]。但快速干燥时,水分散失会在颗粒内部留下缝隙,从而加大扩散系数。在冷却和干燥过程中,淀粉由糊化后的无定形状态转变为玻璃态,以及淀粉中的晶体(直链淀粉-脂质复合物形成的晶体)增加,会一定程度地影响颗粒内的脱水作用。水分的

扩散对产品的品质有一定的影响,尤其是快速干燥过程中颗粒内外容易形成水分梯度,从而导致较高的爆腰率^[10]。因此建议在到达最终含水量之前加入缓苏过程,降低内外水分梯度,防止在冷却过程中出现裂纹。

3 蒸谷米的品质

蒸谷过程涉及对稻谷或糙米进行水热处理,其中发生的理化变化显著影响了蒸谷米的加工、营养、感官和储存品质,如图2所示。

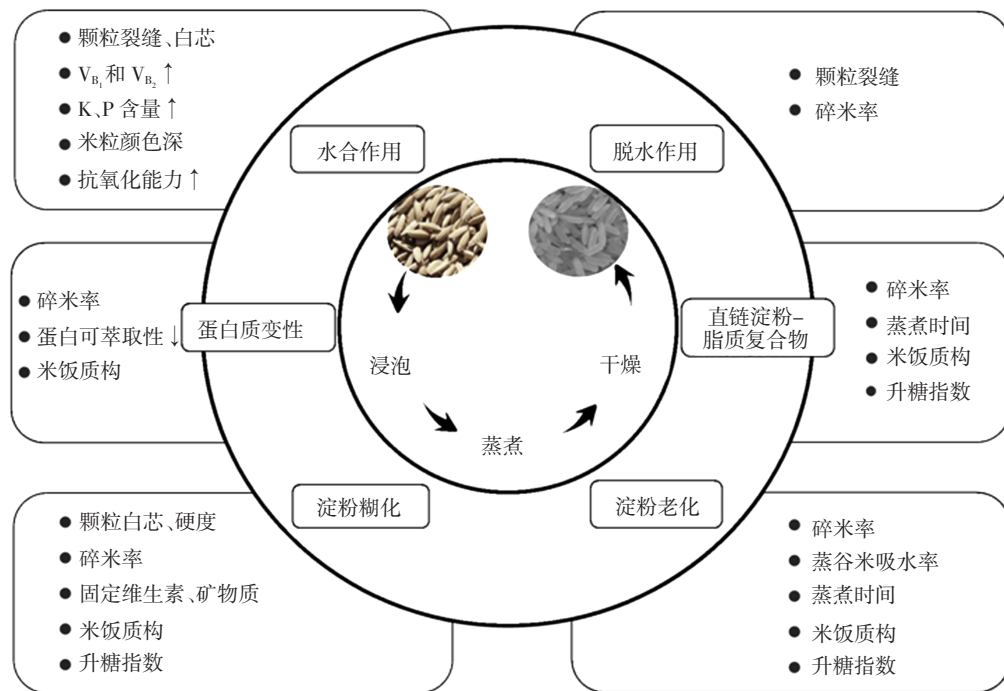


图2 蒸谷过程中的理化变化及对蒸谷米品质的影响

Fig. 2 Physical and chemical changes in the parboiling and their influence on the quality of parboiled rice

3.1 加工品质

3.1.1 碎米率

蒸谷米的优点之一是减少了在脱壳和碾米过程中的破损程度,而实现这一目的需要合适的加工条件。水稻籽粒破碎的程度主要是由裂缝、垭白度、成熟度和水稻籽粒尺寸决定的。蒸谷米的碎米率取决于蒸谷过程以及由此引起的物理化学和机械性能的变化,比如淀粉的糊化和谷粒中的裂纹。此外,蛋白质聚合、直链淀粉-脂质复合物形成、淀粉老化等变化也会影响颗粒的破碎敏感性。稻谷在浸泡过程中存在水分梯度,颗粒中心的含水量较低会导致加热过程中淀粉无法充分糊化,干燥后的产品白芯现象严重,从而在碾米过程中增加碎米率。Perez等^[30]研究发现,增加浸泡的温度可以减少稻谷产生的裂缝,因为较高的温度有利于水分的扩散以及消除水分梯度。淀粉糊化可以确

保颗粒中没有白芯,并减少了蒸谷米的裂纹,从而降低了碾米过程中的碎米率,但过度蒸煮会造成籽粒的变形或破裂,从而增加碾米过程中的破损。如何对不同品种的稻谷进行适当的蒸谷处理,以获得更好的碾米产率需要更多的探究。

3.1.2 蒸煮时间

蒸煮时间即将大米烹饪至白芯消失的最佳烹饪时间,Tian等^[31]研究发现糙米的蒸煮时间为35 min,蒸谷米的蒸煮时间相比较于糙米显著降低,为23 min,接近于精白米的蒸煮时间(20 min)。Pal等^[32]通过对不同品种的大米研究发现,蒸谷米在烹饪结束后的吸水量低于精白米,这也被认为是蒸谷米所需蒸煮时间长的原因。经过水热处理后,蒸谷米颗粒的紧密度增加,使得水分难以渗透。Singh等^[33]对不同品种大米的堆积密度与蒸煮时间之间的关系进行探究,发现具有较高堆

积密度(即结构紧凑)的大米显示出较慢的吸水率,从而导致更长的蒸煮时间。

3.2 营养品质

蒸谷米由于水热处理,颗粒中的蛋白质、淀粉、维生素、矿物质等物质发生变化,使其具有比精白米更好的营养品质。

3.2.1 蛋白质

水稻中的蛋白质主要集中在米糠中,其中主要蛋白质是球蛋白(约12%)和谷蛋白(约80%),次要的是白蛋白(约5%)和醇溶蛋白(约3%)^[34]。对不同品种的大米研究发现,相比较于精白米,蒸谷米中的蛋白质含量更高^[32]。程科等^[10]发现,无论以何种方式干燥的蒸谷米,其蛋白质含量高于精白米。研究者们通常对蛋白质在不同培养基中的可萃取性进行研究,以此表征蒸谷米经过水热处理后蛋白质的变化。Kato等^[35]发现,由于水热处理,颗粒中蛋白质的可萃取性降低了约45%,可能是由于蛋白质的热变性。Buggenhout等^[34]发现蒸煮条件对可提取蛋白质的含量有明显的影响,提高蒸煮程度导致蛋白质的提取率大大降低,这表明蛋白质的网络结构更加密集。对蛋白质的分子量分布进行研究发现,谷蛋白在剧烈的蒸汽条件下发生聚合,而白蛋白、球蛋白和醇溶蛋白通过二硫键、氢键和疏水作用形成单独的蛋白质网络或与谷蛋白网络交联。蛋白质的变性影响淀粉的膨胀、流变性质,对于蒸谷米产品品质的形成具有重要意义^[36]。

3.2.2 淀粉

蒸煮过程中淀粉颗粒吸水膨胀,结晶区消失,而冷却干燥过程中淀粉发生老化,不可逆地改变了淀粉的微观结构^[37]。Ong等^[38]认为在蒸谷米中主要存在3种淀粉形式:剩余的未糊化淀粉、回生的淀粉、直链淀粉-脂质复合物。蒸谷米中淀粉结晶结构的形成取决于蒸谷的条件以及游离的直链淀粉。在蒸煮后,颗粒中相对结晶度降低,表明结晶区被破坏,形成无定形区域^[39]。但经过一段时间的老化,蒸谷米中存在回生淀粉形成的晶体结构,以及直链淀粉-脂质复合物。

精白米在食用后能被人体快速消化,造成血糖指数在短时间内快速升高,是一种高升糖指数产品,对于高血压和糖尿病患者健康尤其不利。Hamad等^[40]发现,相比较于精白米和糙米,蒸谷米在测试时间内(0~120 min)均显著降低餐后血糖水平。蒸谷米的淀粉水解平衡率显著低于精白米,研究者在蒸谷米表面观察到致密的结构,认为这是降低蒸谷米消化率的物理屏障。此外,冷却干燥过程会导致糊化淀粉发生回生,并形成难以消化的淀粉-脂质复合物^[41]。高抗性淀粉含量

的蒸谷米被认为会降低碳水化合物的消化,以及增加饱腹感,抑制肠胃蠕动,取代易消化的碳水化合物,降低餐后血糖指数^[42]。无论何种品种,蒸谷米都比精白米能显著降低餐后血糖反应。

3.2.3 维生素

维生素主要存在于麸皮中,因此普通精白米在碾米过程会造成维生素的损失。而与精白米相比,蒸谷米中的维生素含量更高。研究证实,蒸谷米中的维生素A和维生素C因为高温作用造成损失,但蒸谷过程显著增加了最终产品中的水溶性营养因子,尤其是B族维生素。蒸谷米中核黄素和硫胺素的含量显著高于相对应品种的精白米,这归功于颗粒中维生素随着水分的扩散而迁移,在胚乳中得到富集^[43]。Manful等^[44]发现市售蒸谷米中的硫胺素含量为精白米的7倍,并且与蒸谷强度呈线性关系;而核黄素含量随着蒸谷强度的增加,出现先增加后降低的趋势。核黄素在蒸煮过程中发生热分解,或随着浸泡温度的增加,核黄素溶解到水中。Juliano等^[45]认为蒸谷处理会造成水溶性维生素和其它麸皮成分由表皮向胚乳中扩散。但更早的研究表明,仅仅通过浸泡过程并没有增加硫胺素的含量,反而经过加热后含量有所增加,据研究者推测,淀粉糊化有利于固定扩散至胚乳中的维生素^[46]。

3.2.4 酚类物质

酚类化合物具有抗血栓、抗氧化和清除自由基等生理功能。水稻中的抗氧化活性归因于原花青素和花青素含量较高^[47]。由于蒸谷过程中酚酸从麸皮层向内迁移至胚乳,从而在碾米过程有所保留,因此酚酸在蒸谷米和精白米的分布有所不同^[48]。Pal等^[32]对不同品种的大米进行研究,以DPPH自由基清除率表征抗氧化能力,发现蒸谷米的抗氧化活性为24.36%~41.26%,高于精白米(14.25%~25.24%)。蒸谷处理后,蒸谷米的总酚含量和抗氧化能力均显著增加,其中,总酚含量越高的蒸谷米,其抗氧化性越好^[32]。水热处理也被报道会导致细胞壁结构不稳定,从而导致结合酚类物质(如对香豆酸和阿魏酸)的可萃取性增加,意味着有利于其释放^[48]。

3.2.5 矿物质

稻谷中含有多种矿物质,如钾、钙、镁、磷、锌、铁、铜和钠等。普通精白米由于碾去麸皮,因此与糙米相比,钾、磷元素含量显著降低。Heinemann等^[49]发现蒸谷米中的钾、磷含量与蒸谷处理后的糙米相当,稍低于糙米但显著高于精白米,说明这两种元素主要位于麸皮中,而蒸谷过程使其部分迁移至胚乳,从而在碾米过程中被保留。稻谷中其它的元素,如锰、钙、锌,均

匀分散在麸皮及胚乳中,在浸泡和蒸煮过程中由胚乳向外迁移或析出,在碾米过程中被更多地除去。此外,营养液浸泡与蒸谷处理相结合,是制备营养强化型大米的一种经济高效的方法。Wahengbam 等^[50]将糙米在

硫酸锌溶液中浸泡,经过蒸煮、干燥、碾米后,所得的蒸谷米产品中锌元素含量显著增加。

蒸谷米与精白米中的营养物质比较如表 2^[32,43,49]所示。

表 2 蒸谷米与精白米中营养成分比较
Table 2 Comparison of nutrients between parboiled rice and white rice

组别	维生素/(mg/100 g)		矿物质/(mg/100 g)							蛋白质/%	脂肪/%	灰分/%	总酚/(mg GAE/g)
	V _{B1}	V _{B2}	K	P	Mg	Ca	Zn	Fe	Cu				
蒸谷米	0.14~0.16	0.021~0.027	143.21	58.85	15.43	4.61	1.15	0.43	0.17	9.46~11.22	0.75~0.97	0.76~0.97	0.99~1.79
精白米	0.12~0.13	0.010~0.022	65.46	41.98	15.06	6.70	2.09	0.40	0.18	6.36~9.01	1.02~1.58	0.59~0.78	0.64~1.12

3.3 感官品质

3.3.1 颜色

蒸谷米具有颜色更深的黄色外观。蒸谷米和精白米之间测量到的颜色差异取决于蒸谷米制备过程中浸泡和蒸煮条件,其中总色差 E 随着浸泡后水分含量和淀粉糊化程度的增加而增大^[51]。Leethanapanich 等^[52]发现随着浸泡温度的增加,蒸谷米的颜色逐渐变深。这符合有关于蒸谷米颜色变深的机制之一,即在浸泡过程中,色素从谷壳和麸皮到胚乳的扩散导致颜色的变化。此外,水热处理导致的非酶褐变,如焦糖化和美拉德反应,也是导致蒸谷米颜色变化的重要原因。Lamberts 等^[52]发现,还原糖含量在蒸煮后降低,说明由淀粉降解的还原糖在蒸煮过程中发生了美拉德反应,与蛋白质反应形成棕色物质。淀粉的糊化和老化、蛋白粒的减少、色素由麸皮向胚乳的迁移以及美拉德反应产物的形成,对蒸谷米颜色加深具有一定作用。

3.3.2 颗粒硬度

硬度是稻谷比较重要的理化性质,会直接影响碾米过程中的碎米率。Taghinezhad 等^[4]发现蒸谷米的硬度与相对糊化度线性相关($R^2=0.88$),随着相对糊化度的增加,颗粒的硬度增加。Nasirahmadi 等^[53]发现,当蒸煮时间从 10 min 延长到 20 min 时,颗粒的极限应力显著增加($p \leq 0.01$)。在蒸煮过程中,由于糊化的淀粉可以填充颗粒内部的孔,去除颗粒内部的空隙,从而使颗粒得以强化,而增加蒸煮时间会导致颗粒中更多的淀粉发生糊化,经冷却干燥后提高其抗断裂能力。颗粒因淀粉糊化而获得的超微结构越均匀致密,米粒的硬度越高^[54]。

3.3.3 米饭的质构特征

米饭的质构是影响消费者喜好度的重要品质属性,其中硬度和黏度尤为重要^[55]。米饭的质构取决于直链淀粉和支链淀粉的含量,直链淀粉含量高的大米往往硬度较大且不黏,支链淀粉含量高的大米则黏软。

Tian 等^[3]研究发现,与精白米相比,蒸谷米饭的硬度明显增加,而黏度降低。刘园等^[56]通过单因素试验,发现传统蒸谷米生产工艺中对硬度的影响因素依次为蒸煮时间、蒸煮温度、浸泡时间、浸泡温度。Ong 等^[57]认为蒸谷过程中淀粉晶型的形成对最终蒸谷米饭的质构形成具有重要作用。此外,Derycke 等^[28]认为蒸煮过程中形成蛋白质屏障(由通过二硫键连接的蛋白质组成),会限制烹饪过程中固体的溶出,从而降低蒸谷米饭的黏度。Buggenhout 等^[58]发现蒸谷米经过水热处理,形成均匀致密的超微结构,使得烹饪过程中水分的扩散变得困难,以及溶出物减少,从而增加了硬度,同时降低了黏度^[44]。

3.4 储存品质

经碾磨之后的大米在储存过程中容易受到生物、物理和化学因素的影响^[59]。其中酶的作用最为明显,脂肪由于脂肪酶的作用水解,产生游离脂肪酸,从而对大米的食味品质产生不利影响。Koh 等^[60]对在 25 °C 下保存一年的蒸谷米和精白米样品的酸值进行检测发现,蒸谷米样品保持相对稳定,说明在室温 25 °C 条件下,蒸谷处理可以提升大米长期的氧化稳定性。蒸谷米加工过程中的水热处理使得颗粒中的脂肪酶被灭活,并且对微生物有一定的破坏作用^[61]。同时蒸谷米也会丧失发芽能力,从而延长储存期。

研究者对不同品种的精白米和蒸谷米中的脂质含量进行测定,通过方差分析发现,蒸谷过程对脂质含量的影响显著。蒸谷米中的脂质含量相较于精白米有不同程度的降低,出现这种现象是由于脂质受热分解破裂,胚乳中的脂肪向外层麸皮中移动,从而在碾磨过程中被除去,因此蒸谷米糠中的含油量更高^[32]。米糠是脂质的天然来源,含有超过 25% 的油,尤其是不饱和脂肪酸。作为必需脂肪酸的来源,米糠中的脂质由于不稳定容易发生腐败。与其他处理方式如烤制相比,经过蒸谷处理后的米糠在储存期间最稳定。

4 存在的问题及展望

蒸谷米在加工、营养、感官和储存方面具有诸多优势,深受欧美、南亚和中东等消费者的喜爱。在国内,消费者对于蒸谷米的可接受度低,我国生产的蒸谷米多数用于出口。造成这种现象的原因,其一是蒸谷米在制作过程中经过的水热处理致使其米色较深。我国消费者普遍喜爱颜色洁白的大米,并以此作为评判大米优劣的标准。而蒸谷米由于色素迁移、非酶褐变等作用使得米色呈棕黄色,不符合大众的消费喜好。此外,对于喜爱米饭有黏性以及软硬度适中的消费者来说,由于淀粉的糊化、回生等物理变化,使得蒸谷米饭相较于普通米饭较硬且不黏。蒸谷米的感官特性是限制其扩大国内市场的重要因素,也是未来改善蒸谷米产品品质的重点。尽管近年来出现了有关于改善品质的研究,如使用微波处理以提高蒸谷米的白度,但如何将其适用于工业化生产以及开发新的加工工艺仍值得研究。由于稻谷或糙米需进行水热处理,过程中要使用过量水对原料进行浸泡,因此在蒸谷米制备过程中会产生大量的加工废水^[62]。如何对废水进行处理,以达到国家排放标准,并且在此过程中节约能源、降低成本等问题还需进一步地探究和实践。

水分的扩散、淀粉的糊化和回生、直链淀粉-脂质复合物的形成、蛋白质的变性等诸多理化变化使蒸谷米具有更多的优势,比如高营养、耐储存等,但也造成了蒸谷米色泽、质构品质的劣化。随着居民对健康饮食的重视,蒸谷米正逐渐走入大众视野。因此,加强对蒸谷米品质形成的基础研究,对于改善蒸谷米产品的最终品质,扩大蒸谷米的消费市场,以及使其符合消费者的喜好具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王留留,朱丽丽,张颜红,等. 浅谈蒸谷米的研究现状[J]. 食品工业, 2013, 34(1): 164-167.
WANG Liuli, ZHU Lili, ZHANG Yanhong, et al. The discussion of parboiled rice's research actuality [J]. The Food Industry, 2013, 34(1): 164-167.
- [2] PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in *Japonica rice* grains under various isothermal soaking conditions[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2615-2623.
- [3] LEETHANAPANICH K, MAUROMOUSTAKOS A, WANG Y J. Effect of soaking temperature on commingled rice properties[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 267-274.
- [4] TAGHINEZHAD E, KHOSHAGHAZA M H, MINAEI S, et al. Relationship between degree of starch gelatinization and quality at-

- tributes of parboiled rice during steaming[J]. Rice Science, 2016, 23(6): 339-344.
- [5] PATINDOL J, NEWTON J, WANG Y J. Functional properties as affected by laboratory-scale parboiling of rough rice and brown rice [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(8): E370-E377.
- [6] 吴芳. 蒸谷米的概述[J]. 现代食品, 2018(8): 120-121, 137.
WU Fang. Overview of parboiled rice[J]. Modern Food, 2018(8): 120-121, 137.
- [7] 李逸鹤, 马栋. 蒸谷米生产中干燥工序工艺参数的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(12): 69-72.
LI Yihe, MA Li. Study on the drying process parameters of parboiled rice[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(12): 69-72.
- [8] PRACHAYAWARAKORN S, PRACHAYAWASIN P, SOPONRON-NARIT S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers[J]. LWT-Food Science and Technology, 2006, 39(7): 770-778.
- [9] 刘学武, 严伟龙, 何易雯, 等. 不同处理方式对蒸谷米复水性的影响[J]. 农产品加工, 2020(1): 43-46.
LIU Xuewu, YAN Weilong, HE Yiwen, et al. Effect of different treatment methods on rehydration of steamed rice[J]. Farm Products Processing, 2020(1): 43-46.
- [10] 程科, 郭亚丽, 范露, 等. 干燥方式对蒸谷米品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2019(6): 1-4, 9.
CHENG Ke, GUO Yali, FAN Lu, et al. Effect of drying methods on the quality of parboiled rice[J]. Cereal & Feed Industry, 2019(6): 1-4, 9.
- [11] 任广跃, 王芳, 张忠杰, 等. 干燥温度及缓苏操作对稻谷爆腰的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(19): 112-114.
REN Guangyue, WANG Fang, ZHANG Zhongjie, et al. Effects of drying temperature and tempering on kernel cracking of paddy[J]. Food Research and Development, 2013, 34(19): 112-114.
- [12] XU X N, YAN W L, YANG Z K, et al. Effect of ultra-high pressure on quality characteristics of parboiled rice[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 117-123.
- [13] 高雅文, 张大力, 方丽, 等. 蒸谷米超高压浸泡工艺条件优化[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 153-158.
GAO Yawen, ZHANG Dali, FANG Li, et al. Optimize the process conditions for ultra-high pressure soaking of parboiled rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 153-158.
- [14] 朱惠莹, 甄思宇, 吴跃. 蒸谷米快速浸泡工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(1): 72-74.
ZHU Huixuan, ZHEN Siyu, WU Yue. Study on rapid soaking technology of parboiled rice[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(1): 72-74.
- [15] 周显青, 张鹏举, 张玉荣, 等. 柠檬酸浸泡对蒸谷糙米碾米过程中蒸谷米镉含量和品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 50-57.
ZHOU Xianqing, ZHANG Pengju, ZHANG Yurong, et al. Effect of citric acid soaking on cadmium content of parboiled rice during milling and on its quality attributes before and after cooking[J]. Food Science, 2020, 41(2): 50-57.

- [16] PANDA B K, SHRIVASTAVA S L. Microwave assisted rapid hydration in starch matrix of paddy (*Oryza sativa* L.): Process development, characterization, and comparison with conventional practice [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 240–249.
- [17] ROCKEMBACH C T, MELLO EL HALAL S L, MESKO M F, et al. Morphological and physicochemical properties of rice grains submitted to rapid parboiling by microwave irradiation[J]. LWT, 2019, 103: 44–52.
- [18] THAMMAPAT P, MEESO N, SIRIAMORN PUN S. Effects of the traditional method and an alternative parboiling process on the fatty acids, vitamin E, γ -oryzanol and phenolic acids of glutinous rice[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 230–236.
- [19] JITTANIT W, ANGKAEW K. Effect of superheated–steam drying compared to conventional parboiling on chalkiness, head rice yield and quality of chalky rice kernels[J]. Journal of Stored Products Research, 2020, 87: 101627.
- [20] BEHERA G, SUTAR P P. Effect of convective, infrared and microwave heating on drying rates, mass transfer characteristics, milling quality and microstructure of steam gelatinized Paddy [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(8): e12900.
- [21] SANISO E, PRACHAYAWARAKORN S, SWASDISEVI T, et al. Parboiled rice production without steaming by microwave–assisted hot air fluidized bed drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 120: 8–20.
- [22] BALBINOTI T C V, JORGE L M D M, JORGE R M M. Modeling the hydration step of the rice (*Oryza sativa*) parboiling process[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 216: 81–89.
- [23] SRIDHAR B S, MANOHAR B. Hydration kinetics and energy analysis of parboiling indica paddy[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(2): 173–183.
- [24] MIAH M A K, HAQUE A, DOUGLASS M P, et al. Parboiling of rice. Part I: Effect of hot soaking time on quality of milled rice[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2002, 37(5): 527–537.
- [25] SITTIPOD S, SHI Y C. Changes of starch during parboiling of rice kernels[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 238–244.
- [26] BASUTKAR N N, SIEBENMORGEN T J, WANG Y J, et al. Functional properties of commingled rice–cultivar lots[J]. Cereal Chemistry Journal, 2015, 92(1): 114–119.
- [27] 何易雯, 秦鹏鹏, 严伟龙, 等. 浸泡和蒸煮对蒸谷糙米糊化特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(4): 161–163.
HE Yiwen, QIN Kunpeng, YAN Weilong, et al. Effect of soaking and steaming treatment on gelatinization characteristics of parboiled brown rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(4): 161–163.
- [28] DERYCKE V, VANDEPUTTE G E, VERMEYLEN R, et al. Starch gelatinization and amylose–lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X–ray scattering and differential scanning calorimetry[J]. Journal of Cereal Science, 2005, 42(3): 334–343.
- [29] UZMAN D, ŞAHBAZ F. Drying kinetics of hydrated and gelatinized corn starches in the presence of sucrose and sodium chloride [J]. Journal of Food Science, 2000, 65(1): 115–122.
- [30] PEREZ J H, TANAKA F, UCHINO T. Modeling of mass transfer and initiation of hygroscopically induced cracks in rice grains in a thermally controlled soaking condition: With dependency of diffusion coefficient to moisture content and temperature–A 3D finite element approach[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(3): 519–527.
- [31] TIAN J H, CAI Y D, QIN W, et al. Parboiling reduced the crystallinity and *in vitro* digestibility of non–waxy short grain rice [J]. Food Chemistry, 2018, 257: 23–28.
- [32] PAL P, SINGH N, KAUR P, et al. Effect of parboiling on phenolic, protein, and pasting properties of rice from different paddy varieties [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(11): 2761–2771.
- [33] SINGH N, KAUR L, SINGH SODHI N, et al. Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars[J]. Food Chemistry, 2005, 89(2): 253–259.
- [34] BUGGENHOUT J, BRIJS K, DELCOUR J A. Impact of processing conditions on the extractability and molecular weight distribution of proteins in parboiled brown rice[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(1): 8–14.
- [35] KATO H, OHTA T, TSUGITA T, et al. Effect of parboiling on texture and flavor components of cooked rice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(4): 818–823.
- [36] DERYCKE V, VERAVERBEKE W S, VANDEPUTTE G E, et al. Impact of proteins on pasting and cooking properties of nonparboiled and parboiled rice[J]. Cereal Chemistry Journal, 2005, 82(4): 468–474.
- [37] HAPSARI A H, KIM S J, EUN J B. Physical characteristics of parboiled Korean glutinous rice (Olbyeosall) using a modified method[J]. LWT – Food Science and Technology, 2016, 68: 499–505.
- [38] ONG M H, BLANSHARD J M V. The significance of starch polymorphism in commercially produced parboiled rice[J]. Starch–Stärke, 1995, 47(1): 7–13.
- [39] DUTTA H, MAHANTA C L, SINGH V. Changes in the properties of rice varieties with different amylose content on dry heat parboiling [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 65: 227–235.
- [40] HAMAD S, ZAFAR T A, SIDHU J. Parboiled rice metabolism differs in healthy and diabetic individuals with similar improvement in glycemic response[J]. Nutrition, 2018, 47: 43–49.
- [41] LAMBERTS L, GOMAND S V, DERYCKE V, et al. Presence of amylose crystallites in parboiled rice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(8): 3210–3216.
- [42] ADAM C L, WILLIAMS P A, DALBY M J, et al. Different types of soluble fermentable dietary fibre decrease food intake, body weight gain and adiposity in young adult male rats[J]. Nutrition & Metabolism, 2014, 11(1): 1–12.
- [43] 宋玉, 曹磊, 陶澍, 等. 蒸谷米加工的原料适应性及营养特性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2019(3): 6–12.
SONG Yu, CAO Lei, TAO Shu, et al. Material adaptability and nu-

- tritional characteristics of parboiled rice processing[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2019(3): 6–12.
- [44] MANFUL J T, SWETMAN A A, COKER R D, et al. Changes in the thiamine and riboflavin contents of rice during artisanal parboiling in Ghana[J]. *Tropical Science*, 2007, 47(4): 211–217.
- [45] JULIANO B O, PEREZ C M, BLAKENEY A B, et al. International cooperative testing on the amylose content of milled rice[J]. *Starch – Stärke*, 1981, 33(5): 157–162.
- [46] PADUA A B, JULIANO B O. Effect of parboiling on thiamin, protein and fat of rice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1974, 25(6): 697–701.
- [47] MIN B, GU L W, MCCLUNG A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours[J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(3): 715–722.
- [48] MANOSROI A, RUKSIRIWANICH W, KIETTHANAKORN B O, et al. Relationship between biological activities and bioactive compounds in the fermented rice Sap[J]. *Food Research International*, 2011, 44(9): 2757–2765.
- [49] HEINEMANN R J B, FAGUNDES P L, PINTO E A, et al. Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2005, 18(4): 287–296.
- [50] WAHENGAM E D, GREEN B D, HAZARIKA M K. Fortification of zinc in a parboiled low-amylose rice: effects of milling and cooking[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(7): 3434–3442.
- [51] LAMBERTS L, BRIJS K, MOHAMED R, et al. Impact of browning reactions and bran pigments on color of parboiled rice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(26): 9924–9929.
- [52] LAMBERTS L, DE BIE E, DERYCKE V, et al. Effect of processing conditions on color change of brown and milled parboiled rice[J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2006, 83(1): 80–85.
- [53] NASIRAHMADI A, ABBASPOUR-FARD M H, EMADI B, et al. Modelling and analysis of compressive strength properties of parboiled paddy and milled rice[J]. *International Agrophysics*, 2014, 28(1): 73–83.
- [54] 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(1): 127–136.
- [55] RAMESH M, BHATTACHARYA K R, MITCHELL J R. Developments in understanding the basis of cooked-rice texture[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2000, 40(6): 449–460.
- [56] 刘园, 马君敏. 不同工艺条件对蒸谷米品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(24): 97–102.
- LIU Yuan, MA Junmin. Effect of soaking and steaming conditions on the quality of parboiled rice[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(24): 97–102.
- [57] ONG M H, BLANSHARD J M V. Texture determinants of cooked, parboiled rice. II: Physicochemical properties and leaching behaviour of rice[J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 21(3): 261–269.
- [58] BUGGENHOUT J, BRIJS K, CELUS I, et al. The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 117(3): 304–315.
- [59] 曹阳, 邵慧, 郭健, 等. 储存粳米脂肪酸值和酸度变化规律的研究[J]. *粮食与食品工业*, 2014, 21(4): 52–54, 57.
- CAO Yang, SHAO Hui, GUO Jian, et al. Investigation on the regularity of the change in fatty acid value and acidity of rice in storage [J]. *Cereal & Food Industry*, 2014, 21(4): 52–54, 57.
- [60] KOH E, SURH J. Parboiling improved oxidative stability of milled white rice during one-year storage[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25(4): 1043–1046.
- [61] HAN A, JINN J R, MAUROMOUSTAKOS A, et al. Effect of parboiling on milling, physicochemical, and textural properties of medium- and long-grain germinated brown rice[J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2016, 93(1): 47–52.
- [62] 程国强, 刘丹. 蒸谷米加工废水处理工艺的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2012(9): 13–15.
- CHENG Guoqiang, LIU Dan. Study on the treatment process of parboiled rice processing wastewater[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2012(9): 13–15.

加工编辑:姚骏

收稿日期:2020-09-05