

2019年中日稻米产业科技研讨会特约专栏文章之六

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2019.06.008

不同加工精度稻米的营养物质含量、米粉特性及米饭品质研究进展

吴娜娜, 马占倩, 谭斌, 姜平, 翟小童, 乔聪聪, 田晓红, 刘艳香

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘要: 稻米是我国最大宗的主食品种, 与国民健康息息相关。长期以来, 我国稻米加工与消费重在追求口感与外观品质, 导致过度加工现象普遍, 营养流失严重。由于稻米糠层中含有丰富的营养物质, 加工精度显著影响稻米的营养价值。碾米加工过程及加工精度也会对其淀粉结构及性质、米饭的蒸煮感官品质产生影响。综述了加工精度对稻米的营养物质含量、米粉特性及米饭蒸煮和感官品质的影响, 以期为稻米的适度加工提供参考。

关键词: 稻米; 加工精度; 营养物质含量; 米粉特性; 蒸煮和感官品质

中图分类号: TS212.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2019)06-0040-06

Research progress of nutrient content, flour properties, cooking and sensory quality of rice with different milling degree

WU Na-na, MA Zhan-qian, TAN Bin, JIANG Ping, ZHAI Xiao-tong,
QIAO Cong-cong, TIAN Xiao-hong, LIU Yan-xiang

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

Abstract: Rice is the largest staple food species in China, which is closely related to national health. For a long time, it is common to over-process rice which caused serious nutrition loss since pursuit of taste and appearance quality. Because rice bran is rich in nutrients, the milling degree of rice has a significant impact on the nutritional value of rice. Milling process and milling degree will also affect flour properties, and cooking and sensory quality of cooked rice. The effects of milling degree on nutrient content, flour properties, cooking and sensory quality of rice were summarized in order to provide references for the proper processing and milling of rice.

Key words: rice; milling degree; nutrient content; flour property; cooking and sensory quality

稻米是全世界一半以上人口的主食, 同时也是我国最大宗的传统主食, 在我国粮食生产和消费中具有举足轻重的地位^[1]。近年来, 随着生活水平的提高和相关慢性病的高发, 人们越来越注

重营养健康膳食。2017年国务院办公厅关于加快推进农业供给侧结构性改革大力发展粮食产业经济的意见中明确指出, 增加绿色优质粮油产品供给, 推广大米、小麦粉和食用油适度加工, 大力发展全谷物等新型营养健康食品。因此, 开展稻米的适度加工, 以及研究稻米的加工精度对稻米品质的影响, 对我国目前现阶段提升人民的营养健康水平尤为重要。

稻谷脱壳后得到糙米, 糙米主要由果皮、种

收稿日期: 2019-10-6

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0401103); 北京市自然科学基金面上项目(6192028); 国家自然科学基金面上项目(31972113)

作者简介: 吴娜娜, 1981年出生, 女, 博士, 副研究员。

通讯作者: 谭斌, 1972年出生, 男, 博士, 研究员。

皮、胚乳及胚组成,其中包含5%~6%糠层,2%~3%胚芽和92%左右的胚乳^[2]。糙米外层统称为糠层,将糙米进一步碾磨加工得到的精米粒称为白米。碾米过程中去除糠层的程度称为稻米的碾磨度(DOM)或加工精度。糠层是糙米中主要营养物质的聚集区,许多酚类物质、微量营养素、膳食纤维、 γ -氨基丁酸和植酸等都集中在糠层,碾磨过程会使它们发生损失,由于糠层的组成不同,加工精度对稻米的营养成分和营养价值会产生一定的影响。稻米碾磨过程中的机械力和产生较高的温度,淀粉颗粒会产生不同程度的损伤,加工精度也会影响稻米淀粉的结构。不加工精度的稻米糠层组成含量不同,造成米粉的吸水、糊化、老化等特性不同。稻米糠层对蒸煮处理具有一定的热抵抗力。因此,加工精度对稻米的蒸煮品质和感官品质也有影响。

1 不同加工精度稻米中的营养物质

糙米是一个“营养素包”^[3],富含各种营养素和生理活性物质。糙米糠层中主要含有酚类、矿物质、可溶与不溶膳食纤维、谷维素、B族维生素、维生素E、蛋白质等各类生理活性组分。糙米在碾米加工成稻米的过程中,经过好几道碾米、抛光等加工过程后,这些营养物质都有不同程度的损失。

1.1 矿物质

矿物质是人体保持均衡饮食的必需成分,对于保持人体正常的代谢功能具有重要的作用。糙米品种众多,矿物质来源丰富,如铁、钙、钾、氯、铜、磷、锰、镁、硫和锌等。然而,糙米大多情况下都会被加工成精白米,碾磨和抛光作为白米生产过程中的重要操作步骤,对稻米中的营养成分(尤其是矿物质)具有重要的影响。由于水稻基因型、农艺和栽培条件等各因素的影响,水稻中的矿物质含量可能有所不同。

经过抛光处理(9% DOM)后,不同品种稻米中的矿物质含量也有明显下降,原因是在抛光处理过程中去除了稻米中的米糠成分^[4]。韩飞等^[5]以三道碾米一道抛光工序,制成米机1、米机2、米机3和精米四个加工精度的稻米样品,发现随

加工精度的提高,4个样品中的矿物元素(K、Mg、P、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Na、Se、Zn)含量均有下降。另外,有研究^[6]表明随着从糙米到精米加工程度的增加,稻米中的Ca、P、Fe含量均显著性降低。糙米中的平均矿物质含量(DOM=0%)为1.6%,随着从外糠层向中胚乳层的递进,矿物质含量下降^[7]。Reddy等^[4]研究发现抛光导致糙米、黑米和紫米中的磷(2 062.1~2 529.7 mg/kg)、钾(1 546.8~1 843.6 mg/kg)、硫(743.5~976.1 mg/kg)、镁(377.2~387.6 mg/kg)、钙(77.6~136.2 mg/kg)、铁(47.2~88.8 mg/kg)、锌(34.9~53.9 mg/kg)、铜含量(27.5~33.4 mg/kg)均显著下降,这些糙米中的矿物质含量比经过抛光稻米中的高出0.75~2.5倍。这与Itanietal等^[8]报道大部分矿物质存在于糠层中(61.0%),精米中仅含11.6%的研究结果相一致。研究发现矿物质集中在稻米外层中,随0、10、20、30、100 s碾磨时间的增加,导致硒含量逐渐下降^[9]。同样,Liang等人^[10]研究发现长、中、短粒稻米品种中的铜、锌和磷含量都随加工精度的增加而降低。碾磨特性随籽粒形状和品种的不同而不同,分析这是因为质量损失与碾磨时间有很好的正相关性,水稻籽粒形状的不同,形成了不同的纹路,随着碾磨时间的延长,碾磨过程中籽粒的断裂程度有所提高,矿物质含量随着碾磨时间的延长而降低。研究表明,随加工精度的提高,稻米中的铁、锌含量损失率均显著增加,且不同基因型稻米间的含量有显著差异,这可能是由于碾磨程度和铁、锌在稻米不同部位中的含量分布造成的^[11]。

1.2 膳食纤维

糙米是膳食中纤维的一个很好的来源。流行病学的许多研究和调查已经证明,稻米膳食纤维在维持健康方面具有重要的生理作用。膳食纤维(DF)是一种非淀粉多糖复合物,来自植物的可食用部分或类似碳水化合物,可抵抗人小肠的消化和吸收,并在大肠中完全或部分发酵。膳食纤维根据溶解度可分为两个主要成分:可溶成分,例如果胶,树胶和 β -葡聚糖;不溶性成分,包括纤维素,木质素和半纤维素^[12]。不溶性纤维增加了粪便的体积,并加快了粪便通过结肠的速度。

可溶性纤维有助于保持血糖水平稳定,还可以带来饱腹感并防止暴饮暴食^[13]。

从营养角度来看,研究表明在所有被检测的糙米中的总膳食纤维含量都比精米中的要高,主要是因为不同部位的含量分布和所采取加工工序的不同^[14]。Bhattacharya 等^[6]研究发现糙米的纤维含量最高(1.47%),是精米(10%的碾磨精度,0.28%)的 5.25 倍,是胚乳中(0.22)的 6.68 倍。Kim 等^[2]研究发现随着碾磨度的增加(0%~5%~10%),4 种所选稻米糙米中的总膳食纤维含量均显著降低。Xia 等^[15]测定了 0%、3%、6%、9% 4 种碾磨度籼稻样品中的膳食纤维,发现随加工程度的提高,所选籼稻中的膳食纤维含量逐渐降低。此外,有研究报道称随着加工工序的增加,经过抛光后的稻米中的可溶性、不可溶性和总膳食纤维含量相对于含有 50%和 30%米糠含量的稻米较低,这也可归因于糠层逐渐被碾磨去后,胚乳部分不断增加,从而使得淀粉含量的增加,且有不同含量米糠的稻米样品之间的可溶性膳食纤维含量差异不显著($P>0.05$)^[16]。笔者所在研究团队研究结果表明,在经过 4 道碾米、抛光、色选等工序后,与糙米相比,稻米中总的膳食纤维损失 49.5~63.4%(数据尚未发表)。以上结果发现稻米经碾磨或者抛光工序以后,膳食纤维会不同程度的发生损失,因此,在稻米的加工过程中应选择合理的碾磨和抛光方式以及加工程度,以防止有益的膳食纤维过多的丢失,从而降低稻米的营养特性。

1.3 酚类物质及其抗氧化活性

糙米糠层中包含许多对人体健康有益的酚类物质,常见的主要有酚酸(对香豆酸、咖啡酸、阿魏酸、香草酸和丁香酸等)、黄酮(黄酮醇、黄酮类、儿茶素、花青素等)等。它们包括可被提取到溶液中的游离态酚类物质,以及通常通过酯键、醚键与细胞壁组分共价结合的不溶性酚类物质,主要以结合态为主。游离酚酸在人的胃和小肠中被吸收,对低密度脂蛋白和脂肪的氧化有保护作用^[17],不溶性的结合酚酸部分通过酶在小肠中消化,有些在结肠中被结肠微生物消化^[18]。酚类物质被认为是有益人体健康的关键来源^[19]。流

行病学研究表明,经常食用包含糠层的全谷物有助于保持健康,并可能降低患慢性疾病、心血管疾病、II 型糖尿病,肥胖和癌症的风险^[20]。

研究发现不同加工精度的稻米中酚类物质含量不同,且随着从糙米到精米加工精度的增加,酚类物质的含量逐渐降低^[21]。同样有学者选用 6 个黑米品种,以不同的碾磨程度(0%、4.2%、10.5%)研究得出未抛光(0%)黑米中的总酚、总黄酮和花青素含量均显著高于其他抛光品种($P<0.05$),且随着碾磨程度的增加,总酚、总黄酮和花青素含量均显著降低,发现黑米中的主要酚酸为阿魏酸,游离酚中的花色苷主要为花青素-3-O-葡萄糖苷^[22]。另外,Ti 等^[23]研究表明米糠中游离酚、结合酚和总酚含量分别是糙米的 5.4、5.0 和 5.3 倍,分别是精米的 36.8、19.1 和 32.5 倍,糙米中游离酚、结合酚和总酚含量分别是精米的 6.8、3.8 和 6.1 倍。米糠中游离酚、结合酚和总酚含量最高,其次是糙米,最后是精米。笔者所在研究团队研究了我国典型的稻米加工工艺,即分别经过 4 道碾米、色选和抛光后,与糙米相比,稻米中酚酸损失 67.0%~76.6%,黄酮损失 57.0%~87.7%,花青素几乎全部损失(数据未发表)。尽管经过碾磨、抛光和色选等加工过程可能提高了稻米的感官品质,但随着加工精度的提高,糙米中一些有益于人类健康的酚类物质也损失了。随着加工精度的增加,酚类物质的逐渐流失与不同粉碎级样品中的酚类物质分布有关。

酚类化合物是植物的次生代谢产物,可以清除自由基并进一步降低氧化应激反应,保护生物大分子免受潜在损害,酚类化合物的抗氧化特性可预防肥胖、糖尿病、动脉粥样硬化、癌症和心血管疾病等慢性疾病^[24]。研究还发现随着加工精度的增加,糙米中的细胞抗氧化活性(CAA)平均值从 208.6 降至 15.01 mol QE(槲皮素)/100 g DW,分析结果与用 DPPH 或 ABTS 等化学方法测定抗氧化活性的研究结果一致^[25]。例如 Reddy 等^[4]研究发现 DPPH 抗氧化活性的降低主要归因于在稻米抛光处理(DOM=9%)中去除了米糠,其含有大量酚类化合物。同样 Paiva 等^[26]用 DPPH 法研究得出当碾磨精度从 0% 增加到 6%时,糙

米的抗氧化活性从 10.17 下降到 4.48 $\mu\text{mol TE}$ (水溶性维生素 E) /g, 而对黑米和红米品种的研究表明, 在碾磨精度为 10% 时, 它们的抗氧化活性都下降了 95% 以上。另外, 有学者研究发现红米和白米品种中的抗氧化活性在加工精度 10% 和 100% 水平上均下降, 且加工精度为 100% 时, 稻米的抗氧化活性更低^[27]。可见, 稻米的加工精度显著影响其抗氧化活性, 加工精度越高, 抗氧化活性越低。

1.4 γ -谷维素

由于稻米中的生物活性物质主要集中在糠层中, 碾磨造成了大量微量营养素的损失。 γ -谷维素作为稻米中的一种重要的生物活性化合物, 主要由反式阿魏酸与植物甾醇(甾醇和三萜醇)的酯组成, 具有降低胆固醇的作用^[28]。据报道, γ -谷维素的体外抗氧化活性是维生素 E 的 4 倍^[29]。此外, 它还被用于治疗高脂血症, 更年期障碍和增加肌肉质量^[30]。米糠是 γ -谷维素的主要来源, 稻谷和碾米组分的其他副产品中 γ -谷维素的含量不高。

Tuncel 等^[29]研究发现糙米、未抛光的大米、白米、白垩米、稻谷和米糠中 γ -谷维素含量范围为 12.19~3 296.5 mg/kg, 当糙米变成白米时, 经碾米和抛光步骤后, 稻米中的 γ -谷维素含量降低了约 94%, 糠层是 γ -谷维素的最佳来源。Butsat 等^[31]分析了从不同生长地点采集的泰国水稻品种中的米糠、糙米、精米, 并报道了 γ -谷维素含量范围分别为 3 430~5 380, 410~950, 200~330 mg/kg。还发现在不同地区种植的同一种水稻品种的 γ -谷维素含量存在显著差异。另外, 有研究表明随着从糙米到抛光精米加工工序的增加, 稻米中的 γ -谷维素含量显著降低^[16]。总之, 随着加工工序的提高, 稻米中的 γ -谷维素含量不断降低, 表明糠层 γ -谷维素含量较高, 进一步研究米糠组分的组成和加工行为, 可能是增值加工获得特定的有益化合物和提高经济效益的重要途径。

2 不同加工精度稻米的米粉特性

稻米主要以米饭的形式进行食用, 由于淀粉是稻米籽粒中的主要成分, 淀粉的糊化对稻米蒸

煮和加工过程中的理化性质至关重要。在热诱导糊化过程中, 淀粉颗粒膨胀到初始尺寸的几倍, 并由于结晶顺序的改变和水的吸收而部分穿孔。

Zhu 等^[32]研究了碾磨精度分别为 0%、6.6% 和 10.4% 的糙米、中等碾磨度精米和白米, 发现糙米的糊化温度高于中等碾磨度精米和白米, 中等碾磨度精米和白米的糊化温度无显著性差异 ($P>0.05$), 碾磨处理会提高稻米粉的胶凝性质, 且从糙米到中度碾磨精米碾磨过程中去除的组分是减缓加热时淀粉散乱的主要原因, 这与 Mariotti 等人^[33]和 Xia 等^[15]研究不同碾磨度(0%、3%、6%和 9%) 稻米凝胶在相同的温度下, 碾磨程度越高, 回生速度越快, 糊化程度越高结果相一致。Kim 等^[34]研究了稻米品种和碾磨精度对稻米粘度性质的影响, 随着碾磨精度的增加, 米粉糊化温度逐渐降低, 峰值粘度和在 95 时的粘度均增加, 但所选 4 种不同品种稻米粉之间的最终粘度和回生值差异不显著。同样, 研究表明糙米煮熟的时间相当于白米的两倍, 这主要归因于与白米相比, 糙米的吸水率更低^[35]。Desikachar 等人^[36]证明了去除糙米 1% 的糠层后, 增加了稻米的吸水率。糙米和精米蒸煮时间的差异也可能与其淀粉糊化温度的差异有关。已有研究证明糊化温度较高的稻米淀粉样品比糊化温度较低的样品需要更长的熟化时间^[37]。脂质与大米直链淀粉和支链淀粉的结合可能导致更高的糊化温度。稻米中的脂质去除率随着从未碾磨(糙米)到 9% 碾磨度(白米)的提高而增加, 加工精度的提高和脂肪的损失都会导致糊化温度的下降^[35]。

综上所述, 加工精度会影响米粉特性, 而这些发现可以给食品加工者提供合适的条件以延缓淀粉老化, 并生产出高质量的淀粉基食物, 从而实现营养和储藏特性相对比较平衡的稻米加工模式, 可能对食品工业产生重要的经济影响。

3 不同加工精度稻米的食用品质

稻米的食用品质主要是指稻米食用过程中所表现出的感官特征。Bhattacharya 等^[6]研究表明, 糙米不好煮熟是因为在煮沸过程中不容易吸收水分, 但最终糠层会裂开, 进而水化过程开始,

导致糙米发生破裂,但在不是特别需要的情况下这种煮熟糙米的外观是不被大多数人所接受的。Mohapatra 等^[38]将芳香细长品种、中粒品种、短圆品种 3 个稻米品种的样品碾磨成 2%~18%的不同精度,发现和其他两个品种相比,芳香细长品种的稻米具有更高的蒸煮指数。蒸煮指数是由最佳蒸煮时间、吸水率、体积膨胀率和长度膨胀率 4 个指标来表示。研究结果表明,加工精度在 10%~13%之间时,3 种稻米的外观和蒸煮指数在可接受的范围内。碾磨度(DOM)值和蒸煮指数随加工精度的增加而增加,主要受籽粒硬度和形状的影响。不同碾米率的稻米与糙米煮熟后的口感明显不同,可能原因是位于糙米种皮和果皮上的蜡或角质层降低了吸水率^[39]。Desikachar 等^[36]将糙米磨成 2%~3%的碾磨程度后,显著提高了稻米的吸水性,降低了烹调时间。煮熟糙米硬度最高,粘性最低,且随着碾磨率的降低,硬度和粘着性有下降的趋势。

加工精度除了会影响米饭的口感和结构特征外,加工精度对米饭的风味特性也有一定的影响。稻米加工程度越高,米饭风味成分含量损失越严重。相对于糙米,碾磨 3、6、9 min 的稻米挥发性成分总量分别减少了 50.7%、73%、79%^[40]。加工精度对风味特性的影响可能取决于稻谷干燥后的水分含量以及品种。Park 等人^[41]研究报道 14 种不同品种米饭的甜味随着加工精度的增加而增加,且品种间具有显著的差异性。精米米饭中的特殊香味(如硫味、淀粉味和金属味)和风味(如硫磺味)比在糙米中强烈得多^[42]。米糠层的去除工艺使得稻米在机械碾磨过程中营养物质发生大量流失,产生较高的破碎率,但加工精度的提高同时也改善了稻米的外观、蒸煮质量和适口性,所以,综上应尽量减少稻米加工过程中的淀粉破损,保留糙米中尽可能多的营养成分,使其具有较好的蒸煮特性。

4 小结与展望

随着加工精度的提高,稻米中的酚类物质、矿物质、膳食纤维及抗氧化活性等降低,稻米糊化温度降低,吸水率增加,米饭硬度增加,加工精度提高可改善稻米的外观、蒸煮品质和适口性,

但加工精度过高会导致稻米营养成分损失严重,稻米蒸煮和感官品质下降。因此,稻米的适度加工是保留营养成分和提高稻米感官品质的必要手段,也是主食营养健康的发展趋势。我国稻米品种众多,研究加工精度对不同品种的稻米营养成分和感官品质的影响,做到稻米既好吃又营养是今后研究的重点方向之一。另外,也需要发展稻米适度加工装备以及适度加工稻米储藏技术及品质提升的研究,建立稻米加工技术、品质控制技术、标准和装备体系,促进我国主食营养和我国人民健康水平的提高。

参考文献:

- [1] 谭斌,吴娜娜,谭云.我国稻米加工产业发展若干问题的探讨[J].粮油食品科技,2014,22(2):1-5.
- [2] KIM H W, OH S K, KIM D J, et al. Changes in contents of nutritional components and eating quality of brown rice by pericarp milling[J]. Korean Journal of Crop Science, 2012, 57(1): 35-40.
- [3] 谭斌,刘明,吴娜娜,等.发展糙米全谷物食品改善国民健康状况[J].食品与机械,2012,28(5):2-5.
- [4] REDDY C K, KIMI L, HARIPRIYA S, et al. Effects of polishing on proximate composition, physico-chemical characteristics, mineral composition and antioxidant properties of pigmented rice[J]. Rice Science, 2017, 24(5): 241-252.
- [5] 韩飞,陈曦,第文龙,等.不同加工程度稻米的营养特性研究[C].第十二届全国营养科学大会论文汇编.2015.
- [6] BHATTACHARYA K R. Degree of milling (DM) of rice and its effect. In Rice Quality, A Guide to Rice Properties and Analysis[M]. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 2013, 100-115.
- [7] LAMBERTS L, BIE E D, VANDEPUTTE G E, et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice[J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1496-1503.
- [8] ITANI T, TAMAKI M, ARAI E, et al. Distribution of amylose, nitrogen, and minerals in rice kernels with various characters[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50: 5326-5332.
- [9] LIU K, CAO X, BAI Q, et al. Relationships between physical properties of brown rice and degree of milling and loss of selenium[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(1): 69-74.
- [10] LIANG J, LI Z, TSUJI K, et al. Milling characteristics and distribution of phytic acid and zinc in long-, medium- and short-grain rice[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(1): 83-91.
- [11] SAENCHAI C, PROM-U-THAI C, JAMJOD S, et al. Genotypic variation in milling depression of iron and zinc concentration in rice grain[J]. Plant and Soil, 2012, 361: 271-278.
- [12] EMAGA T H, ROBERT C, SÉBASTIEN N. RONKART, et al.

- Dietary fibre components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(10): 4346-4354.
- [13] SAVITHA Y S, SINGH V. Status of dietary fiber contents in pigmented and non-pigmented rice varieties before and after parboiling[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2011, 44(10): 2180-2184.
- [14] LAI V M F, LU S, HE W H, et al. Non-starch polysaccharide compositions of rice grains with respect to rice variety and degree of milling[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(3): 1205-1210.
- [15] XIA W, LIU C, LUO S, et al. Effect of low temperature on the retrogradation behavior of rice gels with different milling degrees[J]. *Starch*, 2015, 67(11): 1044-1052.
- [16] YILMAZ N. Middle infrared stabilization of individual rice bran milling fractions[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 179-185.
- [17] MIN B, GU L, 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.
- [18] SAURA-CALIXTO F, SERRANO J. Intake and bioaccessibility of total polyphenols in a whole diet[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(2): 492-501.
- [19] WANG L, CHEN J, XIE H, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of Adlay varieties[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013, 61(21): 5103-5113.
- [20] OKARTER N, LIU R H. Health benefits of whole grain phytochemicals[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 50(3): 193-208.
- [21] LIU L, GUO J J, ZHANG R F. Effect of degree of milling on phenolic profiles and cellular antioxidant activity of whole brown rice[J]. *Food Chemistry*, 2015, 185: 318-325.
- [22] CHOI S, SEO H S, LEE K R, et al. Effect of cultivars and milling degrees on free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of black rice[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2018, 61(1): 49-60.
- [23] TI H, ZHANG R, ZHANG M, et al. Effect of extrusion on phytochemical profiles in milled fractions of black rice[J]. *Food Chemistry*, 2015, 178: 186-194.
- [24] TI H, LI Q, ZHANG R, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China[J]. *Food Chemistry*, 2014, 159(13): 166-174.
- [25] KONG S, JUNSOO L. Antioxidants in milling fractions of black rice cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(1): 278-281.
- [26] PAIVA F F, VANIER N L, BERRIOS J D J, et al. Physicochemical and nutritional properties of pigmented rice subjected to different degrees of milling[J]. *Journal of Food Composition & Analysis*, 2014, 35(1): 10-17.
- [27] SOMARATNE G M, PRASANTHA B D R, DUNUWILA G R, et al. Effect of polishing on glycemic index and antioxidant properties of red and white basmati rice[J]. *Food Chemistry*, 2017, 237: 716-723.
- [28] LERMAGARCÍA M J, Ramisramos G, Herreromartínez J M, et al. Classification of vegetable oils according to their botanical origin using amino acid profiles established by direct infusion mass spectrometry[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2010, 22(7): 973-978.
- [29] TUNCEL N B, LMAZ N. Gamma-oryzanol content, phenolic acid profiles and antioxidant activity of rice milling fractions[J]. *European Food Research & Technology*, 2011, 233(4): 577-585.
- [30] PATEL M, NAIK S N. Gamma-oryzanol from rice bran oil: a review. *J Sci Ind Res India*, 2004, 63: 569-578.
- [31] BUTSAT S, SIRIAMORN PUN S. Antioxidant capacities and phenolic compounds of the husk, bran and endosperm of Thai rice[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(2): 606-613.
- [32] ZHU S M, HU F F, RAMASWAMY H S, et al. Effect of high pressure treatment and degree of milling on gelatinization and structural properties of brown rice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(11): 1844-1853.
- [33] MARIOTTI M, SINELLI N, CATENACCI F, et al. Retrogradation behaviour of milled and brown rice pastes during ageing[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(2): 171-177.
- [34] KIM S R, AHN J Y, LEE H Y, et al. Various properties and phenolic acid contents of rices and rice brans with different milling fractions[J]. *Korean Journal of Food Science & Technology*, 2004, 36(6): 930-936.
- [35] CHAMPAGNE E T, MARSHALL W E, GOYNES W R. Effects of degree of milling and lipid removal on starch gelatinization in the brown rice kernel[J]. *Cereal Chemistry*, 1990, 67(6): 570-574.
- [36] DESIKACHAR H S R. Effect of degree of milling on water absorption of rice during cooking[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 1965, 11: 110-112.
- [37] JULIANO B O, PEREZ C M. Major factors affecting cooked milled rice hardness and cooking time[J]. *Journal of Texture Studies*, 2010, 14(3): 235-243.
- [38] MOHAPATRA D, BAL S. Effect of degree of milling on specific energy consumption, optical measurements and cooking quality of rice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 119-125.
- [39] CHAMPAGNE E T. Rice: Chemistry and Technology[M]. American Association of Cereal Chemists, Inc. 3340 Pilot Knob Road. St. Paul, Minnesota 55121-2097, U. S. A.
- [40] 苏慧敏, 张敏, 苗菁, 等. 不同加工程度大米食味变化分析[J]. *食品科学*, 2016, 37(18): 58-63.
- [41] PARK J K, KIM S S, KIM K O. Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice[J]. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(2): 151-156.
- [42] BILLIRIS M A, SIEBENMORGEN T J, WANG Y J. Rice degree of milling effects on hydration, texture, sensory and energy characteristics. Part 2. Cooking using fixed, water-to-rice ratios[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(4): 589-597. ☞

(组稿: 谭云; 审核: 孙辉;
编辑加工: 谭云)