不同碾磨程度对糙米品质及相关性变化

曹荣安[1]，贠佳琦[1]，李金玲[1]，李宏彬[1]，刁静静[2*]，王长远[1,2*]

（1.黑龙江八一农垦大学食品学院，黑龙江大庆 163319）

（2.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术中心，黑龙江大庆 163319）

摘要：为了分析不同碾磨程度对糙米外观变化、营养物质含量、蒸煮及食味品质的影响，该文以空育 131 稻谷品种为原料进行研究，并采用斯皮尔曼方法分析碾磨程度与糙米品质之间的相关性，以获得口感与营养平衡的糙米。结果表明随着碾磨程度的增加（碾减率 0%~7%，% 均为质量分数），整糙米率下降 1.20%，留皮度下降 72.70%。营养组分含量呈显著下降，碾减率增加到 7% 时，蛋白质含量降低 8.60%，粗纤维含量降低 3.40%，淀粉含量升高 11.00%，直链淀粉含量升高 4.60%。Ca、Zn、Fe、Mn 和 Cu 含量分别降低 37.70%、19.21%、17.01%、37.52%、28.25%；VB_1、VB_2、VB_3、VB_5 和 VB_6 含量分别降低 52.39%、25.00%、47.98%、35.36%、42.64%。蒸煮品质结果得出，碾减率从 0% 增加到 7% 时，吸水率、膨胀率、固形物损失率含量分别增加了 50.88%、62.19% 和 5.27%。在碾减率 4% 时，崩解值最大（1 232.56 Pa·s），糊化温度最低（85.73 ℃），此时口感最佳。通过相关性分析得出影响糙米品质好坏程度的指标从大到小的排列顺序是：粗纤维 > 最终黏度 > 热焓值 >VB_3>Ca 含量 > 硬度。综上，得出结论：糙米在碾减率 4%、留皮度 88.80% 时的碾磨程度比较好，此时口感比相同品种的市售糙米更好，营养更均衡。

关键词：糙米；碾减率；品质；相关性

文章编号：1673-9078(2025)10-280-291 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0984

Effect of Different Degrees of Milling on the Quality of Brown Rice and Their Correlation

CAO Rongan[1], YUN Jiaqi[1], LI Jinling[1], LI Hongbin[1], DIAO Jingjing[2*], WANG Changyuan[1,2*]

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: This study investigated the effects of varying different degrees of milling on the appearance changes, nutrient content, cooking, and taste quality of the brown rice variety Kongyu 131. Spearman's method was employed to determine the correlation between the milling degree and brown rice quality, with the aim of obtaining brown rice with balanced taste and nutrition. The results showed that as the milling degree increased (milling rate 0%~7%, with all % indicating the mass fraction), the percentage of whole brown rice decreased by 1.20% and that of bran retention decreased by 72.70%. The content of nutritional components significantly decreased when the milling rate was increased to 7%: the protein content decreased by 8.60%, crude fiber content decreased by 3.40%, starch content increased by 11.00%, and amylose content increased by 4.60%. The contents of calcium, zinc,

引文格式：

曹荣安,贠佳琦,李金玲,等.不同碾磨程度对糙米品质及相关性变化[J].现代食品科技,2025,41(10):280-291.

CAO Rongan, YUN Jiaqi, LI Jinling, et al. Effect of different degrees of milling on the quality of brown rice and their correlation [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 280-291.

收稿日期：2024-07-11；修回日期：2024-10-24；接受日期：2024-10-28

基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD00902）；中央引导地方项目（ZY23QY16）

作者简介：曹荣安（1980-），男，博士，副教授，研究方向：食品科学，E-mail：racao@163.com

通讯作者：王长远（1976-），男，博士，教授，研究方向：粮食油脂及植物蛋白质工程，E-mail：byndwcy@163.com；共同通讯作者：刁静静（1981-），女，博士，研究员，研究方向：粮食油脂及植物蛋白质工程，E-mail：diaojing62@163.com

iron, manganese, and copper decreased by 37.70%, 19.21%, 17.01%, 37.52%, and 28.25%, respectively; the VB_1, VB_2, VB_3, VB_5, and VB_6 contents decreased by 52.39%, 25.00%, 47.98%, 35.36%, and 42.64%, respectively. Analysis of cooking quality revealed that when the milling rate was increased from 0% to 7%, the water absorption, swelling, and solid loss rates increased by 50.88%, 62.19%, and 5.27%, respectively. The maximum disintegration value (1 232.56 Pa·s), minimum pasting temperature (85.73 ℃), and best taste were observed at a milling rate of 4%. Correlation analysis showed that the indices affecting the level of brown rice quality were, in descending order: crude fiber>final viscosity>enthalpy>VB_3>calcium content>hardness. In summary, the optimal degree of milling for brown rice was 4%, at which bran retention was 88.80%; the taste of this rice was superior to that of commercially available brown rice of the same variety and exhibited more balanced nutrition.

Key words: brown rice; milling rate; quality; correlation

稻谷是一种功能广泛的全谷物作物，超过 67% 的世界人口以大米为主食。稻谷经过砻谷机去壳后得到糙米，其主要由米糠层、胚芽和胚乳三部分构成，与精白米相比，呈现米黄色且具有光亮，表面有深浅不一的纵向沟槽。糙米含有多种营养物质，不仅包括淀粉、蛋白质、脂肪等主要宏量组分，还富含膳食纤维、维生素、矿物质元素等生物活性物质[1]。这些成分不仅可以为人体正常生长发育提供所需的营养和能量，还对人体的保健具有一定作用。但由于糙米饭口感差，蒸煮时间长而没有被广泛接受[2]。

适宜的碾磨程度可以减少营养成分的流失、降低耗能并提高出米率[3]。糙米在碾磨过程中，米粒的长度和宽度受碾磨的影响最为显著。随着碾磨程度的提高，糙米从表面到胚乳的总淀粉含量升高[4]，同时粗纤维含量降低，但大部分蛋白质还保留在胚乳中。糙米的蒸煮品质、糊化特性及感官品质均因碾磨程度的变化得到改善[2-5]。当碾磨程度增大时，蒸煮时间减少[6]，糙米在吸水率、膨胀率、峰值黏度、最低黏度和最终黏度等方面均有显著提升，同时糊化温度明显降低[7]。峰值黏度和最低黏度的提升会导致崩解值的变大，崩解值大的米饭食用口感更佳。目前，研究人员主要研究糙米碾磨至精白米过程中的营养物质损失方面[8]，对糙米适宜的碾磨程度研究较少。因此，本研究使用不同碾减率来表示不同的碾磨程度并研究在不同碾减率下糙米的碾磨品质、外观品质、营养品质、蒸煮及食味品质，明确了基于糙米口感和营养平衡的最佳碾减率。本研究为开发出口感更好、营养更平衡的糙米提供了科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

空育 131 号糙米，黑龙江益华米业有限公司；所有试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

VP-32T 实验碾米机，日本佐竹公司；JMWT-12 大米外观检测仪，北京东孚久恒仪器技术有限公司；S-3400N 扫描电镜，科沃安科技（苏州）有限公司；UV-1800 紫外可见分光光度计，日本岛津有限公司；iCAP PRO 电感耦合等离子体原子发射光谱仪，美国 ThermoFisher 公司；液相色谱仪，岛津 LC-20AD；Eclassical 3200L 超高效液相色谱仪，大连依利特分析仪器有限公司；TA. XTC-18 质构仪，上海保圣实业发展有限公司；RVA-Tce Master 快速黏度仪，瑞典波通仪器公司；DSC 扫描量热仪，美国 TA 仪器有限公司。

1.3 碾磨品质测定

取水分含量为 13% 的稻谷脱壳除去杂质和青粒后，取糙米样品 100 g，使用实验室精米机进行碾磨，改变碾磨时间，碾磨后样品质量变为 99 g 时，此时碾减率达到 1%。用以上方法制备出实验所需的碾减率为 2%、3%、4%、5%、6%、7% 的糙米样品[9]所对应的碾磨时间为 10、17、31、38、48、60、75 s。过筛去除糙米表面的多余糠粉，使用大米外观检测仪来测定糙米的整糙米率。出糙率参照 GB/T 5495-2008《粮油检验 稻谷出糙率检验》进行测定。将不同碾磨时间的糙米样品收集至密封袋中，并妥善保存在 4 ℃下。

1.4 外观品质测定

糙米留皮度参照 GB/T 5502-2018《粮油检验 大米加工精度检验》，稍有改动。取 10 g 整糙米，平放在培养皿中，同时加入适量蒸馏水，静置 1 min，振荡培养皿并洗去表面糠粉。冲洗完的样品马上倒入适量伊红 Y-亚甲基蓝染色剂刚好淹没，振荡静置于 2 min，用体积分数为 80% 酒精溶液淹没米粒并用玻璃棒搅拌，不间断漂洗 3 次，漂洗后用滤纸吸干表面水分，经过风干到外表无水滴。用大米外观检测仪进行测定，得

到不同碾减率糙米的留皮度。使用扫描电镜放大 500 倍对糙米表面进行观测。

1.5 营养品质测定

糙米样品中的淀粉、直链淀粉、蛋白质、水分、粗纤维含量分别参照参照 GB/T 5009.0-2008；GB/T 15638-2008；GB 5009.5-2016；GB 5009.3-2016；GB/T 5009.88-2008 进行测定。氨基酸使用液相色谱仪进行测定，首先进行样品溶液水解：将样品粉碎，精密称取适量，精密移取 3.0 mL、6 mol/L 盐酸溶液含 0.1% 苯酚溶液至样品瓶中，超声溶解，将溶液转移至安培瓶中，连续 5 次，充氮，熔封，烘箱 110 ℃水解 24 h 后，精密移取上述样品 1.0 mL，N_2 吹干盐酸，加 1.0 mL 水复溶。精密移取上述溶液 200 μL 加入稀释后的 A 溶液 100 μL 和稀释后的 B 溶液 100 μL，摇匀，室温反应 60 min；然后加入正己烷溶液 400 μL 旋紧盖子后振摇 5~10 s，室温静置分层，取下层 200 L 溶液，加入 800 μL 水混合均匀，再取 200 μL 加入 800 μL 水混合均匀，用孔径为 0.22 μm 有机膜过滤，待分析。仪器参数设定：色谱柱：C18，5 μm，4.6×250 mm；梯度程序：流动相 A：0.1 mol/L 醋酸钠溶液（pH 值 6.50）：乙腈 =93:7，流动相 B：水 : 乙腈 =20:80，流量：1.0 mL/min、柱温：40 ℃、波长：254 nm、进样量：10 μL。

矿物质元素测定按照 Liu 等[10]的方法，有所改动进行测定。采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪进行测定。将 0.000 1 g 样品放入消解管中，向管中加入 3.0 mL 硝酸和 1.0 mL 双氧水后旋紧盖子，随后在 180 ℃下进行加热消解。消解、挥酸完成后静置到室温，用超纯水在 10 mL 容量瓶中定容，等待检测。电感耦合等离子体原子发射光谱仪具体测定参数为：发射功率：1.15 kW，载气：氩气，等离子气流量：15 L/min，辅助气流量：1.5 L/min，雾化器流量：0.75 L/min，检测模式：轴向观测，校准类型：线性。

维生素测定根据谢有发[9]的操作方法进行改良，使用超高效液相色谱仪进行测定并利用超高效液相色谱全自动样品收集系统，在 5 mL 棕色离心管准确称取 0.40 g 样品，加入 1 mL 预先冷却好的 0.1% 甲酸水：甲醇（99:1，*V/V*），在低温下匀浆 120 s，振荡混匀，避光在 4 ℃下超声提取 30 min。接着离心并将上清液转移到另一离心管，重复此操作 2 次，将 3 次上清液合并后定容至 3 mL，振荡混匀。取适量上清液过滤膜测定。色谱分离条件：柱温：35 ℃，进样器温度：15 ℃，流动相组成：流动相 A：10 mm 乙酸铵水溶液 B：乙腈，进样量：3 μL，洗脱方式：等度洗脱 A:B=90:10（*V/V*）。

1.6 蒸煮品质及食味品质测定

吸水率和膨胀率的测定参照 Ding 等[11]的方法，取 5 g 糙米于铝盒中，用蒸馏水和玻璃棒冲洗搅拌重复三次，清洗后，将 50 mL 蒸馏水加入铝盒进行蒸煮，直至取出时不再有米汤滴下为止，然后自然冷却至室温并记录蒸煮前糙米质量、体积和蒸煮后糙米饭质量、体积则可计算出相应的吸水率和膨胀率。固形物损失率根据 Zhao 等[12]的方法进行测定。

糙米饭的质构特性分析是采用质构仪进行测定的，使用 TA4 圆柱探头，直径为 38.1 mm，高度为 20 mm，在探头速度 1.0 mm/s、下压距离为 5 mm、触发力为 250 g 的条件下对冷却的糙米饭进行了 2 次压缩实验。在实验过程中，同时记录糙米饭的硬度、弹性、咀嚼性、内聚性和黏性。

糙米糊化特性使用快速黏度仪进行测定，将 3.50 g 粉碎的糙米放入测试桶中，当待测糙米水分含量为 14% 时加入 25 mL 蒸馏水，放入仪器中进行检测，记录峰值黏度、最低黏度、最终黏度、糊化温度[13,14]。

糙米热力学性能的分析是采用差示扫描量热仪进行测定的，在坩埚中放入 3.0 mg 糙米粉，加入 7 μL 蒸馏水，混合均匀后盖上坩埚盖。将压制好的坩埚平衡 12 h，静置后移入差示扫描量热仪中。设置仪器参数为：氮气流量 150 mL/min、压力 0.1 MPa、以 5 ℃ /min 的速度升温、温度由 20 ℃升至 100 ℃。糊化温度和热焓值用仪器自带的 TA Universal Analysis 软件计算。

1.7 统计分析

试验均重复三次，数据结果均采用均值 ± 标准差来表示。图表用 Origin 2021 进行绘制，SPSS 20.0 软件对数据进行方差差异显著性分析，相关性分析采用斯皮尔曼方法进行分析，$P<0.05$ 和 $P<0.01$ 有统计学差异。

2 结果与分析

2.1 不同碾磨程度对碾磨品质的影响

图 1 反映的是不同碾减率下糙米的整糙米率变化。整糙米率随着碾减率增大而降低，在碾减率 1% 时，整糙米率最高为 98.70%；碾减率为 7% 时，其整糙米率为 97.50%，与 1% 碾减率样品差异显著（$P<0.05$）。整糙米率是反映碾减率是否合适的重要指标，图 1 反映糙米在碾减率 1%~3% 时整糙米率急剧下降，在碾减率 4% 之后整糙米率下降放缓，这不仅因为糙米重量的 5%~8% 为糙米皮层而且糙米皮层的硬度依次递减（果皮层＞种皮层＞糊粉层）[15,16]，当碾磨至种皮层

和糊粉层时趋于平稳。因此选择碾减率 4% 的糙米为最适碾磨度。

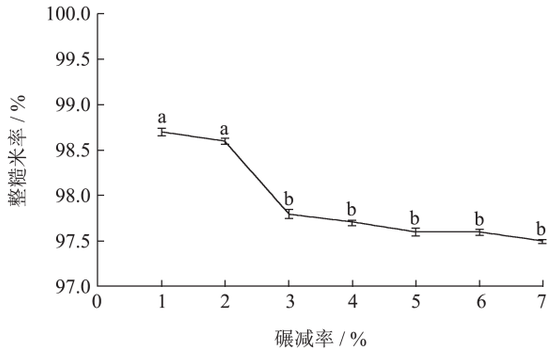


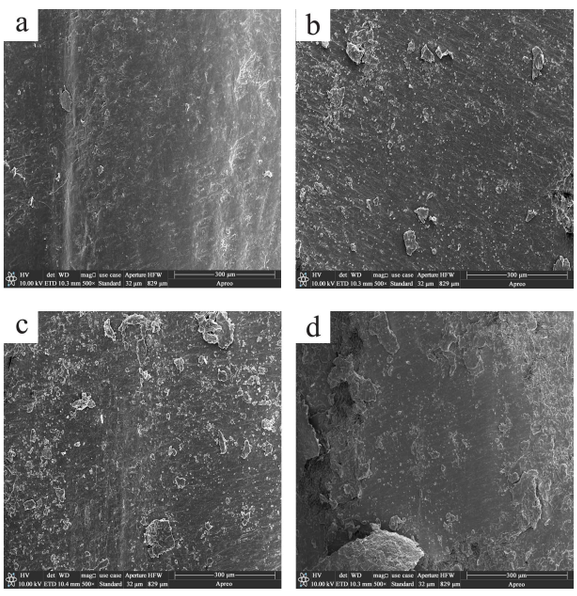
图 1 不同碾减率下的整糙米率

Fig.1 Whole brown rice ratio at different milling rates

注：图中不同字母表示数据之间存在显著差异（$P<0.05$）。

2.2 不同碾磨程度对外观品质的影响

不同碾磨程度的糙米表面的扫描电镜图像如图 2 所示，未碾磨的糙米（见图 2a）表面呈现颗粒均匀、平整，且光滑，碾减率为 1%、2%、3% 的糙米（见图 2b~2d），表面不均匀且有轻微的裂纹，其主要是碾磨掉的种皮残留，以及暴露的糊粉层及少部分凹陷的胚乳[17]。碾减率为 4%、5%、6% 的糙米表面有更多的种皮残留以及糠粉附着在糙米表面，碾减率 6% 的糙米表面可以观察到有明显的沟壑，这可能是随着碾磨程度的增大及部位的不同，产生了凹凸不平的表面。碾减率 7% 的糙米表面散落着大量受损的淀粉或糊粉层颗粒。以上在碾磨过程中糙米表面外观的变化，如凹凸、划痕、淀粉分散和粗糙度，能清楚地表明碾米机在碾米过程中造成的机械损伤[18]。



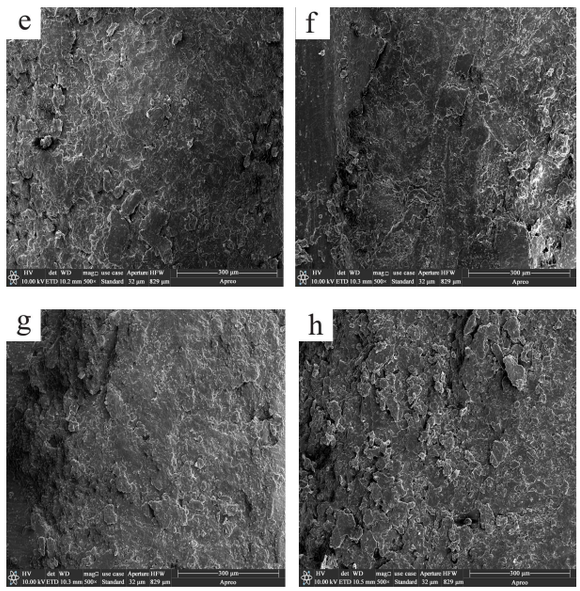
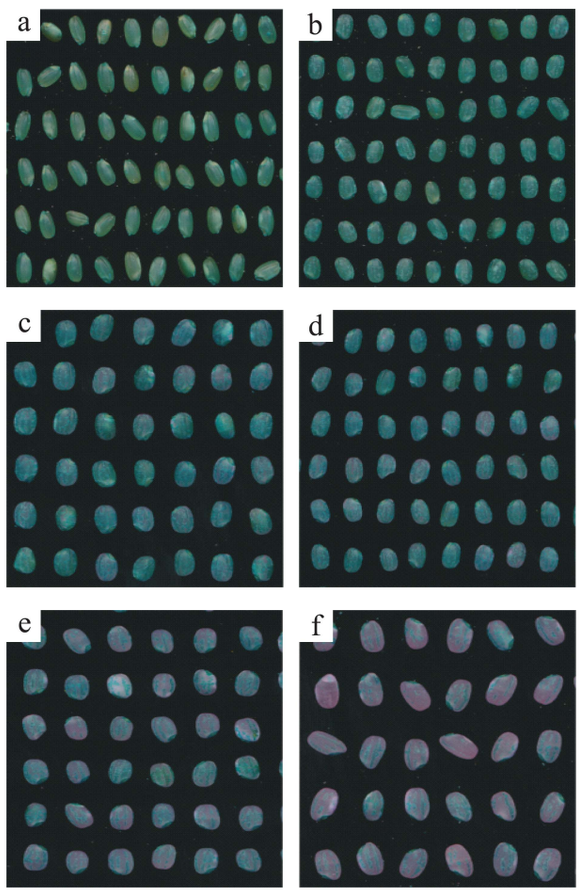


图 2 不同碾磨程度糙米表面扫描电镜图

Fig.2 SEM images of brown rice surface with different degrees milling

注：图 a~h 表示的留皮度分别是 100%、99.9%、99.3%、98.4%、88.8%、56.6%、36.6%、27.3%；碾减率分别是 0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%。图 3 同。



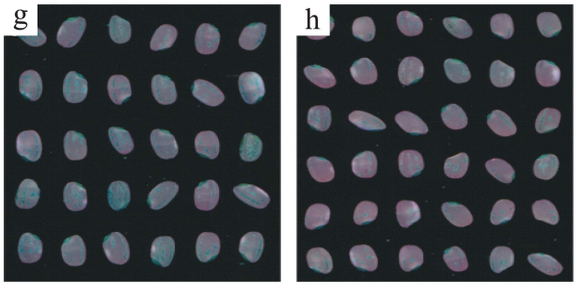


图 3 不同碾磨程度糙米的留皮度染色图

Fig.3 Staining diagram of brown rice with different degrees milling

伊红 Y- 亚甲基蓝染色法使糙米皮层呈蓝绿色，胚乳呈紫红色。处理后的样品经过大米外观品质检测仪进行扫描，扫描图像如图 3 所示。图 3a 至图 3d 反映在糙米碾磨初期（碾减率 0%~3%），由于种皮出现脱落的原因导致留皮度染色情况由深变浅，与图 2a 至图 2d 展示的情况一致。图 3 结果还表明糙米表皮的碾磨顺序最初是米粒表面，其次是腹部，最后是米粒背面。此外，米粒腹部和背部有凹槽，使得米粒表面呈波浪状，因此难以碾磨到糙米的背腹部皮层[18,19]。碾减率 4%、5%、6%、7% 的样品（图 3e~3h）整体呈现紫色且有少量蓝绿色，证明残留少量皮层，所有这些残留物都存在于稻谷的后槽中，这与扫描电镜图的结果一致。

2.3 不同碾磨程度对糙米营养品质的影响

2.3.1 不同碾磨程度对糙米基本营养成分的影响

表 1 反映不同碾磨程度糙米的基本营养成分之间的差异。蛋白质和直链淀粉的含量是评价糙米饭食味品质的重要指标，直链淀粉的含量直接影响糙米的膨胀率和吸水率以及糙米的色泽、光泽和硬度[20]。随着碾减率的增加，糙米的蛋白质含量逐渐降低，这是由于被碾除的皮层富含丰富的蛋白质。碾减率 7% 的糙米与精白米相比，蛋白质含量是其 1.25 倍；与市售糙米相比，未碾磨的糙米与其蛋白质含量一致均为 79 g/kg。糙米中粗纤维含量随碾减率升高而降低，碾减率 7% 的糙米粗纤维含量为 1.65 g/100 g，比精白米中含量高 0.28 g/100 g，适量的粗纤维可以促进肠道蠕动，改善便秘[21]。碾减率与淀粉和直链淀粉含量呈正相关，与精白米相比，不同碾减率的糙米淀粉含量均低于精白米，当碾减率为 7% 时，淀粉含量最高为 619.62 mg/g，显著低于精白米的 722.41 mg/g（$P<0.05$）。原因是淀粉主要分布在胚乳中，当糙米碾磨至精白米时，主要去除的是糙米的果皮、种皮、糊粉层，因此，淀粉在米粒中的比重相对升高。综上所述，改变碾磨程度可以更好的保留糙米中的营养物质。

表 2 所示，不同碾减率糙米共检测出 18 种氨基酸，较高含量的包括亮氨酸、精氨酸、丝氨酸、丙氨酸和门冬氨酸等，较低含量的是蛋氨酸、半胱氨酸、组氨酸等，与文献报道一致[22]。随着糙米碾减率的升高，总氨基酸（TAA）、必须氨基酸（EAA）和非必需氨基酸（NEAA）含量降低，能够评价蛋白质营养价值的 E/T、E/N 体系相对稳定。在本研究中，氨基酸含量均略有变化，不同碾减率糙米各项氨基酸含量均高于同品种的精白米。

表 1 不同碾磨程度糙米的基本营养成分

Table 1 Basic nutritional composition of brown rice at different degrees milling

碾磨程度/%		蛋白质含量/(g/kg)	粗纤维/(g/100 g)	淀粉含量/(mg/g)	直链淀粉含量/%
碾减率	留皮度				
0	100	79.45 ± 0.24^{a}	2.51 ± 0.03^{a}	553.21 ± 3.72^{h}	16.70 ± 0.10^{de}
1	99.9	78.76 ± 0.13^{b}	2.34 ± 0.03^{b}	562.83 ± 1.26^{g}	16.70 ± 0.20^{de}
2	99.3	76.57 ± 0.24^{c}	2.34 ± 0.02^{b}	563.97 ± 3.41^{g}	16.80 ± 0.10^{de}
3	98.4	76.19 ± 0.17^{c}	2.19 ± 0.05^{c}	573.56 ± 2.92^{f}	16.90 ± 0.20^{cd}
4	88.8	75.16 ± 0.16^{d}	2.04 ± 0.05^{d}	592.46 ± 0.87^{e}	17.10 ± 0.10^{bc}
5	56.6	75.40 ± 0.34^{d}	1.96 ± 0.06^{d}	601.82 ± 1.83^{d}	17.20 ± 0.10^{bc}
6	36.6	73.62 ± 0.44^{e}	1.72 ± 0.04^{e}	611.64 ± 0.67^{c}	17.20 ± 0.10^{b}
7	27.3	72.65 ± 0.19^{f}	1.65 ± 0.05^{e}	619.62 ± 0.82^{b}	17.50 ± 0.10^{a}
市售糙米		79.19 ± 0.19f^{ab}	1.64 ± 0.04^{e}	542.21 ± 1.47^{i}	16.60 ± 0.10^{e}
精白米		63.20 ± 0.08^{g}	1.37 ± 0.01^{f}	722.41 ± 1.10^{a}	10.10 ± 0.10^{f}
与不同碾减率的相关性		−0.626**	−0.978**	0.555**	0.054**

注：同一列中的小写字母不同表示数据之间存在显著差异（$P<0.05$），下同。** 在 0.01 水平（双尾）时，相关性显著，下同。

表 2 不同碾减率糙米中氨基酸的百分含量

Table 2 Percentage of amino acids in brown rice with different degrees milling

	不同碾减率/%								市售糙米	精白米
	0	1	2	3	4	5	6	7		
赖氨酸（Lys）	0.18 ± 0.01^{a}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.16 ± 0.01^{bc}	0.16 ± 0.01^{bc}	0.16 ± 0.01^{c}	0.15 ± 0.01^{cd}	0.14 ± 0.01^{d}	0.18 ± 0.01^{a}	0.11 ± 0.00^{e}
苏氨酸（Thr）	0.23 ± 0.01^{a}	0.22 ± 0.01^{ab}	0.22 ± 0.01^{ab}	0.22 ± 0.01^{ab}	0.21 ± 0.01^{ab}	0.08 ± 0.10^{d}	0.16 ± 0.02^{bc}	0.18 ± 0.01^{abc}	0.23 ± 0.01^{ab}	0.13 ± 0.01^{cd}
蛋氨酸（Met）	0.12 ± 0.01^{ab}	0.10 ± 0.01^{ab}	0.09 ± 0.01^{b}	0.03 ± 0.01^{c}	0.02 ± 0.01^{c}	0.02 ± 0.01^{c}	0.01 ± 0.01^{c}	0.01 ± 0.01^{c}	0.13 ± 0.06^{a}	0.01 ± 0.00^{c}
亮氨酸（Leu）	0.45 ± 0.02^{b}	0.44 ± 0.01^{bc}	0.44 ± 0.01^{bcd}	0.43 ± 0.01^{cd}	0.42 ± 0.01^{de}	0.41 ± 0.01^{ef}	0.40 ± 0.01^{f}	0.37 ± 0.01^{g}	0.47 ± 0.01^{a}	0.33 ± 0.01^{h}
异亮氨酸（Ile）	0.12 ± 0.01^{d}	0.18 ± 0.01^{c}	0.18 ± 0.01^{c}	0.18 ± 0.01^{c}	0.19 ± 0.01^{bc}	0.20 ± 0.01^{b}	0.20 ± 0.01^{b}	0.23 ± 0.01^{a}	0.23 ± 0.01^{a}	0.10 ± 0.01^{e}
苯丙氨酸（Phe）	0.29 ± 0.01^{ab}	0.28 ± 0.01^{bc}	0.27 ± 0.01^{cd}	0.27 ± 0.01^{cd}	0.26 ± 0.01^{de}	0.25 ± 0.01^{e}	0.23 ± 0.01^{f}	0.23 ± 0.01^{f}	0.29 ± 0.01^{a}	0.20 ± 0.00^{g}
缬氨酸（Val）	0.30 ± 0.01^{a}	0.28 ± 0.01^{b}	0.27 ± 0.00^{bc}	0.27 ± 0.01^{c}	0.26 ± 0.01^{cd}	0.25 ± 0.01^{d}	0.25 ± 0.01^{d}	0.19 ± 0.01^{e}	0.31 ± 0.01^{a}	0.15 ± 0.01^{g}
精氨酸（Arg）	0.55 ± 0.01^{a}	0.54 ± 0.01^{a}	0.51 ± 0.01^{b}	0.51 ± 0.01^{b}	0.48 ± 0.01^{c}	0.48 ± 0.01^{c}	0.47 ± 0.01^{c}	0.45 ± 0.01^{d}	0.51 ± 0.01^{b}	0.36 ± 0.01^{e}
半胱氨酸（Cys）	0.14 ± 0.01^{a}	0.11 ± 0.01^{c}	0.11 ± 0.01^{c}	0.10 ± 0.01^{c}	0.10 ± 0.01^{c}	0.10 ± 0.01^{c}	0.10 ± 0.01^{c}	0.10 ± 0.01^{c}	0.12 ± 0.01^{b}	0.08 ± 0.01^{d}
甘氨酸（Gly）	0.26 ± 0.01^{ab}	0.26 ± 0.01^{ab}	0.26 ± 0.01^{ab}	0.25 ± 0.01^{abc}	0.25 ± 0.01^{bc}	0.25 ± 0.01^{bc}	0.24 ± 0.01^{c}	0.22 ± 0.01^{d}	0.27 ± 0.01^{a}	0.20 ± 0.01^{e}
丝氨酸（Ser）	0.43 ± 0.01^{a}	0.42 ± 0.01^{ab}	0.41 ± 0.01^{bc}	0.40 ± 0.01^{c}	0.40 ± 0.01^{c}	0.38 ± 0.01^{d}	0.37 ± 0.01^{d}	0.35 ± 0.01^{e}	0.42 ± 0.01^{ab}	0.32 ± 0.01^{f}
酪氨酸（Tyr）	0.38 ± 0.08^{a}	0.27 ± 0.01^{b}	0.27 ± 0.01^{b}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.25 ± 0.01^{bc}	0.27 ± 0.01^{b}	0.21 ± 0.01^{c}
谷氨酸（Glu）	1.39 ± 0.01^{a}	1.38 ± 0.01^{b}	1.33 ± 0.01^{c}	1.29 ± 0.01^{d}	1.28 ± 0.01^{d}	1.24 ± 0.01^{e}	1.20 ± 0.01^{f}	1.15 ± 0.01^{g}	1.37 ± 0.01^{b}	0.95 ± 0.01^{h}
组氨酸（His）	0.18 ± 0.01^{a}	0.18 ± 0.01^{a}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.16 ± 0.01^{b}	0.11 ± 0.01^{c}	0.17 ± 0.01^{ab}	0.08 ± 0.01^{d}
丙氨酸（Ala）	0.36 ± 0.01^{a}	0.36 ± 0.01^{ab}	0.36 ± 0.01^{ab}	0.35 ± 0.01^{ab}	0.34 ± 0.01^{bc}	0.33 ± 0.01^{cd}	0.32 ± 0.01^{d}	0.31 ± 0.01^{e}	0.36 ± 0.01^{a}	0.29 ± 0.01^{f}
脯氨酸（Pro）	0.28 ± 0.01^{a}	0.28 ± 0.01^{a}	0.27 ± 0.01^{ab}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.26 ± 0.01^{bc}	0.25 ± 0.01^{c}	0.25 ± 0.01^{c}	0.27 ± 0.01^{ab}	0.20 ± 0.01^{d}
门冬氨酸（Asp）	0.73 ± 0.02^{a}	0.71 ± 0.01^{bc}	0.69 ± 0.01^{c}	0.69 ± 0.01^{c}	0.67 ± 0.01^{d}	0.66 ± 0.01^{de}	0.64 ± 0.01^{e}	0.59 ± 0.02^{f}	0.72 ± 0.01^{ab}	0.50 ± 0.01^{g}
羟脯氨酸（Hyp）	0.01 ± 0.00^{a}	0.01 ± 0.01^{a}	0.01 ± 0.00^{a}	0.01 ± 0.00^{a}	0.01 ± 0.01^{a}	0.01 ± 0.01^{a}	0.00 ± 0.00^{b}	0.00 ± 0.00^{b}	0.01 ± 0.00^{a}	0.00 ± 0.00^{b}
总氨基酸（TAA）	6.31	6.18	6.02	5.82	5.72	5.58	5.41	5.09	6.33	4.22
必需氨基酸（EAA）	1.69	1.68	1.65	1.54	1.51	1.48	1.44	1.35	1.81	1.04
非必需氨基酸（NEAA）	4.62	4.50	4.37	4.28	4.20	4.10	3.97	3.74	4.52	3.18
E/T	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.29	0.25
E/N	0.37	0.37	0.38	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.40	0.33

注：同一行中不同的小写字母表示数据值之间存在显著差异（$P<0.05$）。

在不同碾减率下，所有必需氨基酸之间存在显著性差异（$P<0.05$）。在这些必需氨基酸中，缬氨酸的含量降低了 33%，降幅最大。赖氨酸和苏氨酸被确定为第一和第二限制氨基酸，也是谷物中普遍缺少的，在糙米中，赖氨酸的含量相对较低，这在很大程度上限制了糙米蛋白的营养价值[23]。从糙米的碾磨情况来看，未碾磨的糙米与市售糙米差异不显著（$P>0.05$），碾减率 0% 和 5% 的糙米具有显著性差异（$P<0.05$）。蛋氨酸是一种必需氨基酸，也是唯一一种含硫氨基酸，在保护肝脏和心肌方面发挥这重要作用，在不同碾减率下不具有显著性差异（$P>0.05$），然而其含量不及赖氨酸和苏氨酸。未碾磨的糙米，缬氨酸含量为 0.30%，与碾减率 4% 和 7% 的糙米具有显著性差异（$P<0.05$），在本研究中，糙米中缬氨酸含量远高于精白米，最多相差达到 2 倍。糙米胚乳蛋白的异亮氨酸和亮氨酸的含量都大于米糠蛋白[24]。但在本实验中，异亮氨酸的含量随着碾减率的提高而增大。不同碾减率糙米的氨基酸含量均高于精白米，但与市售糙米氨基酸含量差异不显著（$P>0.05$），这是因为较低碾减率更能保留糙米中的营养成分且便于储存[25]，因此与市售糙米没有显著差异。

2.3.2 不同碾磨程度对糙米微量成分的影响

表 3 反映出糙米中含有较丰富的 Ca、Zn、Fe、Mn 和 Cu 等人体必需微量元素，随着碾减率从 0% 升高到 7% 时，糙米中 Ca、Zn、Fe、Mn、Cu 含量均下将[26]。精白米中 Ca 含量为 185.72 mg/kg 与市售糙米 259.93 mg/kg 的含量差异显著（$P<0.05$）。碾减率为 4% 的糙米 Ca 含量与市售糙米相近，约为 255.44 mg/kg。元素 Ca、Zn、Fe、Mn 主要分布在糙米的果皮、种皮与糊粉层中，因此在碾磨后以上四种元素与市售糙米差异显著（$P<0.05$），Cu 元素在糙米胚乳中分布均匀[10]，糙米中 Cu 的含量与精白米差异不显著（$P>0.05$）。

由此可见，糙米 Ca、Zn、Fe、Mn 含量远大于精白米，人们通过食用米饭来获取微量成分，这为糙米中微量成分的研究提供方向。

在糙米的种皮中，含有 VB_1、VB_2、VB_3、VB_5、VB_6 等多种 B 族维生素。通过表 4，可得到不同碾减率与糙米维生素 B 族含量的关系。在本研究中，加工处理后的糙米维生素 B 族含量均远高于精白米。由于 VB_1、VB_2、VB_3、VB_5、VB_6 在糙米的种皮中分布多，因此碾减率与其含量呈负相关。

在碾减率从 0%~1% 时，VB_1 含量下将明显，这也正是因为碾磨脱去糙米种皮的原因。在碾减率 0%~4% 时，VB_2 的含量呈先上升后下降的趋势，这是由于在碾减率 0%~4% 时主要磨除的是糙米的种皮，而 VB_2 在糙米的糊粉层分布较多且均匀。经过碾磨的糙米 VB_3 含量高于精白米（0.645 μg/g），碾减率和 VB_3 含量呈负相关。市售糙米的 VB_3 含量为 0.124 μg/g 与不同碾减率糙米之间具有差异显著性（$P<0.05$）。精白米的 VB_5 含量远远低于糙米，这是因为 VB_5 主要存在于糙米的种皮中，在 2% 的碾减率时，VB_5 含量下将了 12.66%。由此可知，在碾减率为 2% 时已经碾磨掉了大部分的种皮。碾减率 0%~7% 时，VB_6 含量降低了 42.64%。精白米中的 VB_6 含量最少为 0.009 μg/g。

表 3 不同碾磨程度糙米矿物质含量（mg/kg）

Table 3 Mineral content of brown rice at different degrees milling

碾磨程度/%		Ca	Zn	Fe	Mn	Cu
碾减率	留皮度					
0	100	289.18 ± 0.03^{a}	16.92 ± 0.06^{a}	16.34 ± 0.03^{a}	16.18 ± 0.04^{b}	3.15 ± 0.01^{a}
1	99.9	282.93 ± 0.04^{b}	16.17 ± 0.04^{b}	15.70 ± 0.01^{c}	15.47 ± 0.04^{c}	3.09 ± 0.02^{b}
2	99.3	271.74 ± 0.58^{c}	15.22 ± 0.03^{d}	15.67 ± 0.05^{c}	14.14 ± 0.03^{d}	2.62 ± 0.02^{d}
3	98.4	271.91 ± 0.04^{c}	14.85 ± 0.03^{e}	15.54 ± 0.03^{d}	13.95 ± 0.03^{e}	2.55 ± 0.04^{e}
4	88.8	255.44 ± 0.03^{e}	14.35 ± 0.03^{f}	15.54 ± 0.01^{d}	12.02 ± 0.01^{f}	2.53 ± 0.03^{e}
5	56.6	236.31 ± 0.01^{f}	14.23 ± 0.02^{g}	15.13 ± 0.02^{e}	11.52 ± 0.02^{g}	2.36 ± 0.01^{f}
6	36.6	231.65 ± 0.03^{g}	14.17 ± 0.02^{h}	14.63 ± 0.01^{f}	10.13 ± 0.02^{h}	2.33 ± 0.02^{f}
7	27.3	180.16 ± 0.01^{i}	13.67 ± 0.02^{i}	13.56 ± 0.02^{g}	10.11 ± 0.01^{h}	2.26 ± 0.01^{g}
市售糙米		259.93 ± 0.01^{d}	16.12 ± 0.02^{c}	16.23 ± 0.02^{b}	16.42 ± 0.01^{a}	2.82 ± 0.02^{c}
精白米		185.72 ± 0.01^{h}	9.43 ± 0.02^{j}	10.13 ± 0.01^{h}	8.36 ± 0.05^{i}	2.12 ± 0.02^{h}
与不同碾减率的相关性		−0.847**	−0.738**	−0.649**	−0.559**	−0.738**

表 4 不同碾磨程度糙米的维生素含量（μg/g）

Table 4 Vitamin content of brown rice with different degrees milling

碾磨程度/%		VB_1	VB_2	VB_3	VB_5	VB_6
碾减率	留皮度					
0	100	10.031 ± 0.002^{a}	0.012 ± 0.001^{d}	2.395 ± 0.003^{a}	5.517 ± 0.006^{b}	0.197 ± 0.001^{g}
1	99.9	6.203 ± 0.002^{c}	0.023 ± 0.002^{b}	1.814 ± 0.002^{b}	5.073 ± 0.002^{c}	0.184 ± 0.002^{b}
2	99.3	6.057 ± 0.001^{d}	0.022 ± 0.002^{b}	1.572 ± 0.002^{c}	4.431 ± 0.001^{d}	0.171 ± 0.001^{c}
3	98.4	5.914 ± 0.001^{e}	0.023 ± 0.002^{b}	1.546 ± 0.001^{d}	4.322 ± 0.003^{e}	0.162 ± 0.001^{d}
4	88.8	5.885 ± 0.001^{f}	0.023 ± 0.003^{b}	1.504 ± 0.002^{e}	4.125 ± 0.002^{f}	0.144 ± 0.004^{e}
5	56.6	5.757 ± 0.001^{g}	0.016 ± 0.002^{c}	1.497 ± 0.001^{f}	4.042 ± 0.001^{g}	0.147 ± 0.001^{e}
6	36.6	4.846 ± 0.001^{h}	0.015 ± 0.002^{c}	1.314 ± 0.002^{g}	3.687 ± 0.002^{h}	0.116 ± 0.001^{f}
7	27.3	4.776 ± 0.002^{i}	0.009 ± 0.001^{e}	1.246 ± 0.001^{h}	3.566 ± 0.002^{i}	0.113 ± 0.002^{f}
市售糙米		6.818 ± 0.001^{b}	0.043 ± 0.001^{a}	0.124 ± 0.001^{i}	6.356 ± 0.002^{a}	0.804 ± 0.002^{a}
精白米		2.193 ± 0.004^{j}	0.003 ± 0.001^{f}	0.645 ± 0.002^{j}	0.291 ± 0.002^{j}	0.009 ± 0.001^{h}
与不同碾减率的相关性		−0.561**	−0.144	−0.984**	−0.453*	−0.444*

注：** 在 0.01 水平（双尾）时，相关性显著，下同；* 在 0.05 水平（双尾）时，相关性显著，下同。

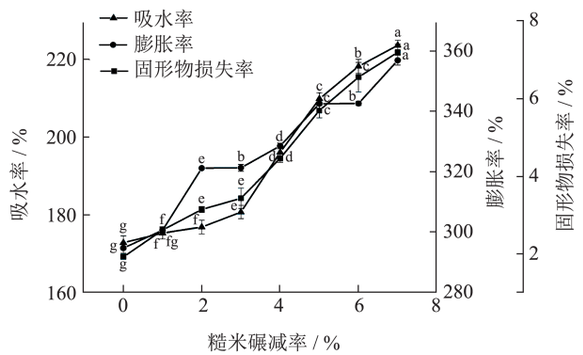


图 4 不同碾减率糙米的吸水率、膨胀率和固形物损失率

Fig.4 Water absorption, swelling and solids loss rates of brown rice with different degrees milling

注：图中不同字母表示数据之间存在显著差异（$P<0.05$）。

2.4 不同碾磨程度对糙米蒸煮及食用品质的影响

2.4.1 不同碾减率糙米的蒸煮品质的影响

不同碾减率对糙米吸水率、膨胀率、固形物损失率的影响如图 4 所示，随着碾减率从 0% 增加到 7%，吸水率、膨胀率、固形物损失率含量分别增加了 50.88%、62.19% 和 5.27%。固形物损失率增大的原因是因为米粒中含有较多水溶性成分，在蒸煮过程中，水分渗透至米粒内部使米粒体积膨胀导致水溶性的营养物质流出。

2.4.2 不同碾磨程度糙米的糊化特性

表 5 反映了不同碾减率糙米的糊化特性的指标。其中，最主要的是糊化温度，影响糊化温度的主要因素是糙米的直链淀粉含量，由于直链淀粉结合能力强，需要的外力更多，会导致糊化温度升高。当峰值黏度高时，最终黏度和回生值会降低，此时米饭口感更好。基于以上原因，选择直链淀粉含量低（10%~17%）、糊化温度和蛋白质含量也较低的样品作为首选对象。由表可知，随着碾减率 0% 增加到 7% 时，糙米峰值黏度、最低黏度、最终黏度分别增加了 53.80%、38.19%、26.74%[21]。Isono 等[27]研究人员认为高崩解值和低回生值的糙米具有好的食用品质。在碾减率 4% 时，崩解值最大，糊化温度最低，原因是存在于糙米皮层和糊粉层的脂肪被不断碾除，与直链淀粉相结合的复合物减少，因此糊化温度降低。精白米的峰值黏度、最低黏度、崩解值、最终黏度均大于碾减率 7% 的糙米。市售糙米糊化指标与碾减率 1%~2% 的糙米相近。因此，碾减率 4%（留皮度 88.8%）的糙米，食用品质最好。

2.4.3 不同碾磨程度糙米的热力学特性

糊化温度会影响糙米饭的吸水率、体积膨胀率与固形物损失率等[28]。糊化温度高所需的蒸煮时间长导致糙米在蒸煮过程中需要更多的时间与能量。随着碾减率不断增大，糙米的皮层不断被除去，所需蒸煮时间不断下降导致糊化温度下降，表 6 反映糙米随着碾减率从 0% 增加到 7% 时，起始温度、峰值温度和终止温度分别下降了 3.21%、2.31%、5.68%。热焓值可以体现淀粉凝胶化反应所需能量[29]，较高的糊化焓证明糙米饭在蒸煮时淀粉的糊化需要消耗更多的能量，导致米饭的品质降低[30]。糊化焓随着碾减率增大表现出先增大后减小的趋势[31,32]。导致这种情况的原因是因为碾减率低的糙米残留的皮层会保护糙米内部的淀粉，同时蛋白质等大分子会使淀粉颗粒间的间隙变小，水分子不易渗入，导致淀粉不易糊化[33]。

表 5 不同碾磨程度糙米的糊化特性

Table 5 The pasting properties of brown rice with different degrees milling

碾磨程度/%		峰值黏度/(Pa·s)	最低黏度/(Pa·s)	崩解值/(Pa·s)	最终黏度/(Pa·s)	回生值/(Pa·s)	糊化温度/℃
碾减率	留皮度						
0	100	2 636.67 ± 52.35^{g}	1 781.33 ± 11.02^{g}	855.34 ± 41.33^{g}	3 489.33 ± 66.56^{e}	1 708.00 ± 55.54^{d}	89.90 ± 0.10^{a}
1	99.9	2 843.33 ± 108.19^{f}	1 987.00 ± 10.82^{e}	856.33 ± 97.37^{g}	3 522.00 ± 25.06^{e}	1 535.00 ± 14.24^{f}	88.83 ± 0.31^{a}
2	99.3	3 067.00 ± 101.17^{de}	1 987.67 ± 14.57^{e}	1 079.33 ± 86.60^{f}	3 635.00 ± 49.33^{d}	1 647.33 ± 34.76^{e}	88.70 ± 0.75^{ab}
3	98.4	3 122.33 ± 92.55^{cd}	1 993.67 ± 7.02^{e}	1 128.66 ± 85.53^{e}	3 702.00 ± 13.00^{d}	1 708.33 ± 5.98^{d}	88.43 ± 0.72^{ab}
4	88.8	3 226.67 ± 61.83^{c}	1 994.11 ± 17.16^{f}	1 232.56 ± 44.67^{c}	3 674.67 ± 29.67^{d}	1 680.56 ± 12.51^{de}	85.73 ± 0.97^{de}
5	56.6	3 374.33 ± 100.2^{b}	2 037.67 ± 38.11^{d}	1 231.66 ± 62.09^{b}	3 891.67 ± 42.86^{c}	1 854.00 ± 4.75^{b}	86.50 ± 1.31^{cd}
6	36.6	3 573.33 ± 96.52^{b}	2 089.67 ± 16.26^{c}	1 228.66 ± 80.26^{b}	3 947.33 ± 75.65^{c}	1 857.66 ± 59.39^{b}	86.53 ± 0.59^{cd}
7	27.3	4 054.67 ± 65.68^{a}	2 661.67 ± 47.17^{b}	1 226.00 ± 18.51^{a}	4 422.33 ± 49.89^{a}	1 760.66 ± 2.72^{c}	87.27 ± 0.47^{bc}
市售糙米		2 953.33 ± 68.81^{ef}	1 741.33 ± 33.95^{g}	1 212.00 ± 34.86^{d}	4 131.33 ± 34.70^{b}	2 390.00 ± 0.75^{g}	71.67 ± 1.11^{e}
精白米		3 939.33 ± 50.08^{a}	2 770.00 ± 17.09^{a}	1 169.33 ± 32.99^{e}	4 166.67 ± 39.02^{b}	1 396.67 ± 21.93^{a}	84.73 ± 0.91^{f}
与不同碾减率的相关性		0.698**	0.471**	0.679**	0.930**	−0.556**	−0.557**

表 6 不同碾磨程度糙米热力学性能

Table 6 The thermal properties of brown rice with different degrees milling

碾磨程度/%		T_0/℃	T_p/℃	T_c/℃	ΔH/(J/g)
碾减率	留皮度				
0	100	62.28 ± 0.18^{b}	68.75 ± 0.03^{a}	89.77 ± 0.15^{a}	2.286 6 ± 0.000 3^{b}
1	99.9	62.17 ± 0.02^{c}	68.75 ± 0.03^{a}	88.92 ± 0.02^{b}	2.592 6 ± 0.000 2^{a}
2	99.3	61.97 ± 0.02^{d}	68.77 ± 0.01^{a}	88.84 ± 0.03^{b}	2.042 8 ± 0.000 2^{c}
3	98.4	61.76 ± 0.01^{e}	68.66 ± 0.03^{b}	87.12 ± 0.03^{c}	2.002 7 ± 0.001 5^{d}
4	88.8	61.62 ± 0.03^{f}	68.66 ± 0.02^{b}	86.36 ± 0.01^{d}	1.991 8 ± 0.000 3^{e}
5	56.6	61.44 ± 0.06^{g}	68.29 ± 0.02^{c}	86.32 ± 0.03^{d}	1.986 8 ± 0.000 4^{f}
6	36.6	61.37 ± 0.02^{g}	67.44 ± 0.02^{d}	85.56 ± 0.02^{e}	1.756 5 ± 0.000 3^{g}
7	27.3	60.28 ± 0.02^{h}	67.16 ± 0.02^{e}	84.67 ± 0.06^{f}	0.957 8 ± 0.000 4^{i}
市售糙米		63.38 ± 0.04^{a}	66.25 ± 0.04^{f}	88.84 ± 0.04^{b}	1.479 4 ± 0.000 2^{h}
精白米		58.93 ± 0.02^{i}	65.49 ± 0.02^{g}	71.80 ± 0.01^{g}	0.662 3 ± 0.000 6^{j}
与不同碾减率的相关性		−0.557**	−0.777**	−0.782**	−0.971**

表 7 不同碾磨程度糙米的质构特性

Table 7 Textural characteristics of brown rice with different degrees milling

碾磨程度/%		硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	黏性/g
碾减率	留皮度					
0	100	3 142.44 ± 58.15^{a}	0.44 ± 0.03^{e}	714.66 ± 4.06^{b}	0.34 ± 0.04^{a}	2.23 ± 0.11^{b}
1	99.9	2 600.36 ± 58.45^{b}	0.64 ± 0.02^{cd}	641.32 ± 4.57^{c}	0.35 ± 0.03^{a}	2.81 ± 0.03^{c}
2	99.3	2 673.36 ± 94.74^{b}	0.65 ± 0.04^{bcd}	594.13 ± 2.45^{d}	0.34 ± 0.01^{a}	4.21 ± 0.07^{d}
3	98.4	2 637.30 ± 55.62^{b}	0.61 ± 0.04^{d}	556.70 ± 8.31^{e}	0.34 ± 0.04^{a}	6.12 ± 0.03^{e}
4	88.8	2 477.03 ± 94.05^{c}	0.65 ± 0.04^{bcd}	551.37 ± 3.25^{e}	0.30 ± 0.03^{a}	8.27 ± 0.09^{f}
5	56.6	2 255.96 ± 59.79^{d}	0.69 ± 0.02^{bc}	507.58 ± 5.34^{f}	0.34 ± 0.04^{a}	9.73 ± 0.05^{g}
6	36.6	2 089.74 ± 20.79^{e}	0.77 ± 0.05^{a}	483.06 ± 5.35^{g}	0.35 ± 0.03^{a}	9.79 ± 0.02^{g}
7	27.3	1 856.65 ± 54.59^{f}	0.70 ± 0.03d^{bc}	132.39 ± 0.82^{h}	0.33 ± 0.05^{a}	13.51 ± 0.24^{h}
市售糙米		2 705.74 ± 23.39^{b}	0.35 ± 0.04^{f}	845.44 ± 10.35^{a}	0.29 ± 0.03^{a}	1.25 ± 0.07^{a}
精白米		1 244.64 ± 108.64^{g}	0.71 ± 0.02^{b}	117.46 ± 3.54^{i}	0.35 ± 0.04^{a}	18.15 ± 0.03^{i}
与不同碾减率的相关性		−0.647**	0.408*	−0.557**	−0.124	−0.560**

2.4.4 不同碾磨程度糙米的质构特性

糙米饭食用品质受到质构特性的影响[34]，不同碾磨程度对其质构特性产生不同影响，具体见表 7。糙米饭硬度的测定能直观体现消费者品尝时口腔的感受，大部分人认为糙米饭口感生硬。随着碾减率从 0% 增加至 7%，米饭硬度下降了 40.92%，与白米饭相比具有差异显著性（$P<0.05$）；与市售糙米饭相比，在碾减率 4% 时的糙米饭具有差异显著性（$P<0.05$），并且硬度值开始迅速降低。这是因为糙米的皮层阻碍水分的渗透，使得淀粉难以完全糊化。随着碾磨程度增加，皮层逐渐磨损脱落，导致米饭硬度降低[35]。

内聚性是指样品抵抗受损并紧密连接，使样品保持完整的性质[36]。经过碾磨处理的糙米饭，内聚性降低了 2.94%，与白米饭和市售糙米饭相比，均不具有显著性差异（$P>0.05$），但在碾减率 4% 时，内聚性出现最低值，证明此时糙米饭仍保留糙米优秀的咀嚼感，又容易被咀嚼成分散的颗粒[37]。

弹性是指米饭在外力作用下发生形变，撤去外力后恢复原来状态的能力。从弹性角度来说，弹性越大，表明其适口性越好[38]。碾减率 0%~7%，弹性提高了 59.1%。经过碾磨处理的糙米比市售糙米弹性更大、口感更佳。

随着碾减率从 0% 增大到 7% 时，咀嚼性降低了 81.48%，黏性增大了 83.49%。皮层含量与糙米饭黏度相关，随碾减率提高，不断碾除糙米皮层，米粒中胚乳不断暴露，淀粉相对含量升高，糊化作用明显，米饭黏度增大[35]。糙米饭最佳的口感应是在口中有饭粒感同时滑润且黏度适中[39]。

从口感体验上来看，碾减率 4% 的糙米表现最佳，此时糙米硬度为 2 477.03 g、内聚性为 0.30、黏性为 8.27 g。

2.5 不同碾减率对糙米营养成分和食用品质的影响

如图 5，探究了不同碾减率对糙米得营养成分和食用品质的影响，并对一些指标进行了斯皮尔曼相关性分析。当相关系数大于零时，表示正相关；小于零则为负相关。相关性系数小于 0.3 时被认为是弱相关，0.3~0.5 为中等相关，超过 0.6 则为强相关。相关系数的绝对值越大，说明相关性越显著[39]。不同碾减率糙米的淀粉含量与吸水率、膨胀率、峰值黏度、最低黏度呈显著正相关，与消减值、起始温度、峰值温度、终止温度、热焓值、硬度、咀嚼性、弹性呈显著负相关，得到此结果的原因是因为淀粉在糙米的胚乳中含量高，碾减率越大，糙米的淀粉含量越高；糙米的淀粉含量越高则越能证明糙米的种皮被碾磨的越多，所以水分子更容易进入糙米内部。随着碾磨程度增大，吸水率、膨胀率、峰值黏度、最低黏度会升高。糙米的峰值黏度与其硬度、咀嚼性和弹性呈现显著负相关，而 T_0、T_p、ΔH 与糙米硬度、咀嚼性和弹性则呈现显著正相关。此外，糙米的吸水率和膨胀率与其硬度、咀嚼性和弹性之间呈显著负相关。然而刘彦霄雪等[33]进行的研究发现，弹性和峰值黏度、吸水率、膨胀率呈显著正相关，与 T_0、T_p、ΔH 呈显著负相关不同，这是因为糙米中直链淀粉高，黏性比较小，随着碾减率增大，直链淀粉含量增大。

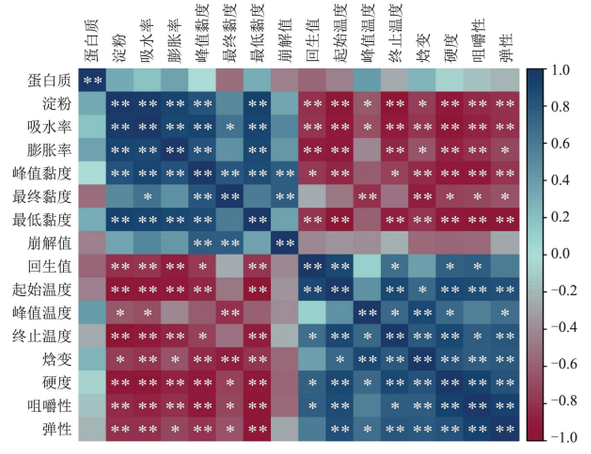


图 5 不同碾磨程度糙米营养成分与食用品质的斯皮尔曼相关系数分析

Fig.5 Spearman correlation coefficient analysis of nutrient composition and eating quality of brown rice with different degrees milling

注：* 表示显著相关系数（$P<0.05$）；** 表示显著的相关系数（$P<0.01$）。

2.6 糙米最佳碾减率的确定

在各品质中选择与碾减率相关性最大的指标进行最佳碾减率的确定。选取的数据有：粗纤维（−0.978**）、Ca 含量（−0.847**）、VB_3（−0.984**）、硬度（−0.647**）、最终黏度（0.930**）、热焓值（−0.971**）。以表 8 中体现的相关性为标准进行分析。由表 8 的相关性可知，影响糙米好坏的指标由大到小排序为粗纤维＞最终黏度＞热焓值＞VB_3＞Ca 含量＞硬度。综合加工过程所需的成本考虑，4% 为最佳碾减率。

表 8 糙米最佳碾减率的确定

Table 8 Determination of the optimal milling rate for brown rice

指数	不同碾减率	粗纤维含量	Ca 含量	VB_3 含量	硬度	最终黏度	糊化焓
不同碾减率	1						
粗纤维含量	−0.984**	1					
Ca 含量	−0.812**	0.849**	1				
VB_3 含量	−0.886**	0.831**	0.497**	1			
硬度	−0.762**	0.819**	0.917**	0.495**	1		
最终黏度	0.902**	−0.888**	−0.876**	−0.728**	−0.711**	1	
糊化焓	−0.888**	0.891**	0.898**	0.703**	0.807**	−0.896**	1

3 结论

该研究通过分析不同碾磨程度糙米外观变化、营养和蒸煮食用品质变化，以及碾磨程度与其品质之间相关性，以期得出营养与口感平衡的糙米制品。结果得出，随着碾减率的增加，整糙米率、出糙率、留皮度降低，糙米表面出现深度不一的裂痕和掉落的糊粉层，且糙米中氨基酸、蛋白质、粗纤维、微量元素含量均随着碾减率的增大而降低。相关性分析发现碾减率与粗纤维的相关性最大（−0.978**）。蒸煮及食用品质方面：碾减率与峰值黏度、最低黏度、崩解值、最低黏度均呈正相关。碾减率与起始温度、峰值温度、终止温度、热焓值、消减值、硬度、咀嚼力、黏性呈负相关。碾减率 4%、留皮度 88.8% 时糙米口感最佳，糙米峰值黏度、最低黏度和最终黏度分别提升了 22.38%、11.95% 和 5.31%。糊化温度略有下降，为 85.73 ℃。吸水率和膨胀率分别升高 14.46% 和 11.48%。米饭硬度减小 665.41 g，黏性提升了 6.04 g，咀嚼性降低了 163.29 mJ。由此可见，碾减率 4% 的糙米糠层被渐渐去除，膳食纤维、蛋白质和脂肪含量减少，糙米淀粉能更好的与水相互作用，使得其蒸煮和食用品质得到了明显改善。研究结果为改进糙米的加工工艺和提升的糙米的食用口感提供了重要依据。

参考文献

[1] WEN Y, MENG N, ZHANG B, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 344-351.

[2] 刘静静,张名位,魏振承,等.不同加工精度下丝苗米品质的比较分析[J].现代食品科技,2021,37(9):186-192.

[3] 张珊,洪滨,沙迪新,等.稻米适度加工及其品质综合评价研究进展[J].食品科技,2023,48(6):125-130.

[4] LAMBERTS L, BIE D E, VANDEPUTTE E G, et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice [J]. Food Chemistry, 2005, 100(4): 1496-1503.

[5] ZHAO S, SHI J, CAI S, et al. Effects of milling degree on nutritional, sensory, gelatinization and taste quality of different rice varieties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 186: 115-244.

[6] 周晓晴.不同加工精度大米食味品质分析及其综合评价研究[D].南昌:南昌大学,2013.

[7] 贺财俊,李怡,吴跃,等.籼米糊化特性与碾磨程度的相关性分析[J].食品科学,2017,38(11):59-63.

[8] REN C G, TANG L, ZHANG M, et al. Structural characterization of heat Induced protein particles in soy milk [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57: 1921-1926.

[9] 谢有发.加工精度对轻碾营养米的营养成分变化及质构特性的影响[D].南昌:南昌大学,2012.

[10] LIU K, ZHENG J, CHEN F. Relationships between degree of milling and loss of Vitamin B, minerals, and change in amino acid composition of brown rice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 429-436.

[11] DING C, CHANG L, LUO Y, et al. Influence of cooking and texture attributes of far infrared radiated Japonica rice during storage [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 112: 103-710.

[12] ZHAO S M, XIONG S B, QIU C G. Effect of microwaves on rice quality [J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 496-502.

[13] YOON M R, CATHERINE W R, KOH H J, et al. A study on the lipid components of rice in relation to palatability and storage [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2012, 55(4): 515-521.

[14] LIU C M, ZHANG Y, LIU W, et al. Preparation physicochemical and texture properties oftexturized rice produce by improved extrusion cooking technology [J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(3): 473-480.

[15] JULIANO B O. Rice: Chemistry and Technology [M]. St Paul: American Association of Cereal Chemists, 1985: 98-120.

[16] 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.

[17] HAIBIN R, SHENGMIN Q, LIANHUI Z, et al. Variations in the appearance quality of brown rice during the four stages of milling [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103344.

[18] WOOD D F, SIEBENMORGEN T J, WILLIAMS T G, et al. Use of microscopy to assess bran removal patterns in milled rice [J]. Agric Food Chem, 2012, 60(28): 6960-6965.

[19] WATSON C A, DIKEMAN E, STERMER R A A note on surface

lipid content and scanning electron microscopy of milled rice as related to degree of milling [J]. Cereal Chem, 1975, 52: 742-747.

[20] OH C H, OH S H. Effects of germinated brown rece extracts with enhanced levels of GAGB on cancer cell proliferation and apoptosis [J]. Journal of Medical Food, 2004, 7(1): 19-23.

[21] 郑燕平.结局导向关键点护理联合颅内压监测在高血压脑出血患者中的应用效果[J].医疗装备,2024,37(4):159-162.

[22] PERDON A A, SIEBENMORGEN J T, MAUROMOUSTAKOS A, et al. Degree of milling effects on rice pasting properties [J]. Cereal Chemistry, 2001, 78(2): 205-209.

[23] PEDERSEN B, EGGUM D B O. The influence of milling on the nutritive value of flour from cereal grains wheat [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1983, 35(1): 175-180.

[24] HAN S W, CHEE K M, CHO S J. Nutritional quality of rice bran protein in comparison to animal and vegetable protein [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 766-769.

[25] 李金平,刘岩,商永辉,等.稻谷样品不同处理方法对脂肪酸值的影响[J].粮油仓储科技通讯,2021,37(1):44-46.

[26] JIANG S L, WU J G, THANG N B, et al. Genotypic variation of min eral elements contents in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Eur Food Res Technol, 2008, 228: 115-122.

[27] ISONO H, OHTSUBO K I, IWASAKI T, et al. Eating quality of domestic andforeign rices of various varieties and characteristics [J]. Journal of the Japanese Societyfor Food Science & Technology, 1994, 41(7): 485-492.

[28] 迟明梅.大米食用品质的研究进展[J].粮食加工,2005, 1:48-51.

[29] MORRISON W R, TESTER R F, GIDLEY M J. Properties of damaged starch granules. II. Crystallinity, molecular order and gelatinisation of ball-milled starches [J]. Journal of Cereal Science, 1994, 19(3): 209-217.

[30] TAMURA M, OGAWA Y. Visualization of the coated layer at the surface of rice grain cooked with varying amounts of cooking water [J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 404-409.

[31] MARSHALL W E. Effect of degree milling and lipid removal on starch gelatinization in thebrown rice kermel [J]. Cereal Chemistry, 1990, 67 (6): 570-574.

[32] MARSHALL W E, Normand F L, Goynes W R. Effects of lipid and protein removal on starchgelatinization in whole grain milled rice [J]. Cereal Chemistry, 1990, 67(5): 458-463.

[33] YANXIAOXUE L, YUQIAN L, JINLI Z, et al. Effects of degree of mulling on phenolics andantioxidant activity of cooked rice during *in vitro* digestion [J]. Cereal Chemistry, 2021, 99(2): 393-404.

[34] SHOBANA S, MALLESHI N, SUDHA V, et al. Nutritional and sensory profile of two Indian rice varieties with different degrees of polishing [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2011, 62(8): 800-810.

[35] IKEDA H. Relationship between the saccharides extracted from rice grains during cooking and the sensory taste of cooked rice [J]. Journal of Home Economics of Japan, 2001, 52(5): 401-409.

[36] GUJRAL H S, KUMAR V. Effect of accelerated aging on the physicochemical and textural properties of brown and milled rice [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2-3): 117-121.

[37] H W, S Z, S H R, et al. Dynamics of texture change and *in vitro* starch digestibility with high-pressure, freeze-thaw cycle, and germination-parboiling treatments of brown rice [J]. Transactions of the Asabe, 2021, 64(1): 103-115.

[38] YU Y, PAN F, RAMASWAMY, H S, ZHU S, et al. Effect of soaking and single/two cycle high pressure treatment on water absorption, color, morphology and cooked texture of brown rice [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(6): 1655-1664.

[39] 李荣华,姜英,吕炜,等.变量间的相关系数及其SPSS中计算[J].教育现代化,2020,7(21):111-112.