

3 种不同粒形大米适碾范围内加工品质分析

安红周^{1,2}, 焦悦^{1,2}, 费小吉¹, 徐杰³, 黄清¹, 刘洁^{1,*}, 杨柳³, 史莉君^{1,2}

(1.河南工业大学粮油食品学院, 河南 郑州 450001; 2.河南省谷物品质分析与加工国际联合实验室, 河南 郑州 450001; 3.丰益(上海)生物技术研发中心有限公司, 上海 200000)

摘要: 本实验以短粒‘吉宏6’、中粒‘稻花香’和长粒‘野香优莉丝’(以下简称‘野香’)糙米为原料, 进行不同压力/时间碾磨加工, 通过测定留皮度、碾减率和碎米率等指标, 研究不同粒形大米适碾范围内加工品质的变化规律。结果表明, 随碾磨压力增加或时间延长, 大米留皮度均呈指数型降低。在GB/T 1354—2018《大米》规定的适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内, ‘吉宏6’‘稻花香’和‘野香’的碾减率变化幅值分别为5.03%、2.98%和0.18%, 说明适度碾制加工过程中并非粒形越长的大米碾减率变化越明显; ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的碎米率分别增加了5.32、0.25、0.21个百分点, 糙出白率分别降低了1.38、2.74、0.21个百分点, ‘野香’虽属长粒形米, 但其在适碾范围内的碎米变化率最小; 与适碾范围大米相比, 若碾至精碾程度(留皮度为0.10%时), ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的碎米率则会分别增加10.36~4.77、1.85~1.60、10.05~9.84个百分点, 糙出白率分别降低4.19~2.81、7.02~4.28、10.65~10.44个百分点, 精碾范围内碎米率的变化对糙出白率影响较大; ‘稻花香’在留皮度2.10%~2.45%时满足GB/T 1354—2018规定的优质粳米留胚率低于20%的要求, 而‘吉宏6’和‘野香’在适碾范围内均不满足此要求; 适碾范围内‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的白度分别增加了6.65、2.80、2.69个百分点; 3种粒形大米的破裂强度均无明显变化规律。3种粒形大米留皮度与碾减率、白度和留胚率在适碾范围内具有显著相关性($P<0.05$ 、 $P<0.01$)。从微观角度分析, 相比于‘稻花香’与‘吉宏6’, 长粒形‘野香’背部和腹部的皮层厚度差别较小; 留皮度为2.00%左右时, 3种大米腹部糊粉层均几乎完全被碾去, 而背部糊粉层保留较多; 留皮度为0.10%左右时, ‘稻花香’和‘吉宏6’籽粒背部仍有少量糊粉层残留, 而‘野香’背部糊粉层已被完全碾除。综上, 不同品种、不同粒形的糙米要实现均匀碾白所需加工精度不一样, 对应的加工品质也不同。

关键词: 大米; 粒形; 适碾范围; 加工品质; 留皮度; 加工精度

Analysis of Milling Quality of Reasonably Well Milled Rice with Three Different Grain Shapes

AN Hongzhou^{1,2}, JIAO Yue^{1,2}, FEI Xiaoji¹, XU Jie³, HUANG Qing¹, LIU Jie^{1,*}, YANG Liu³, SHI Lijun^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Grain Quality Analyzing and Processing, Zhengzhou 450001, China;

3. Wilmar (Shanghai) Biotechnology R&D Center Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: In order to explore changes in the milling quality of reasonably well milled rice with different grain shapes, the bran degree, milling degree and broken rice rate of short-grained (‘Jihong 6’), medium-grained (‘Daohuaxiang’) and long-grained (‘Yexiangyoulisi’, ‘Yexiang’ for short) brown rice were measured after milling at different temperatures and for different periods. The results showed that the bran degree decreased exponentially with an increase in milling pressure for ‘Jihong 6’ and ‘Daohuaxiang’ and an increase in milling time for ‘Yexiang’. For reasonably well milled rice with bran degree from 7.0% to 2.0%, as specified by China’s national standard GB/T 1354—2018, the percentage change in milling degree of ‘Jihong 6’, ‘Daohuaxiang’ and ‘Yexiang’ were approximately 5.03%, 2.98% and 0.18%, respectively, indicating that the milling degree of reasonably well milled rice did not change more significantly with increasing grain length. The broken rice rates of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ increased by 5.32, 0.25 and 0.21 percentage points, respectively, and the white rice yields decreased by 1.38, 2.74 and 0.21 percentage points, respectively. The change in broken rice rate of

收稿日期: 2022-06-09

基金项目: 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司横向课题(GW-CC2018002)

第一作者简介: 安红周(1968—)(ORCID: 0000-0001-6895-9996), 男, 教授, 博士, 研究方向为米制品加工与食品挤压技术应用。E-mail: anhongzhou@163.com

*通信作者简介: 刘洁(1979—)(ORCID: 0000-0001-7847-2380), 女, 副教授, 博士, 研究方向为稻米加工理论与技术。E-mail: liujie@haut.edu.cn

‘Yexiang’ for reasonably well milled rice was the smallest. The broken rice rates of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ at bran degree of 0.10% increased by 10.36–4.77, 1.85–1.60, and 10.05–9.84 percentage points, respectively compared with those at bran degree from 7.0% to 2.0%, and the white rice yields decreased by 4.19–2.81, 7.02–4.28 and 10.65–10.44 percentage points, respectively. So, the effect of changes in broken rice rate at bran degree of 0.10% on white rice yield was more pronounced. ‘Daohuaxiang’ with bran degree of 2.10%–2.45% met germ retention rate of less than 20% for high-quality japonica rice specified in the national standard, while ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ with bran degree from 7.0% to 2.0% did not meet this requirement. At bran degree from 7.0% to 2.0%, the whiteness of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ increased by 6.65, 2.80 and 2.69 percentage points, respectively. There was no significant regular change in the breaking strength of the three rice varieties. The bran degree had a significant correlation with the degree of milling, whiteness and germ retention rate in reasonably well milled rice. As observed by scanning electron microscopy (SEM), the difference in thickness between the dorsal and ventral regions of ‘Yexiang’ was the smallest. When the bran degree was about 2.00%, the ventral aleurone layer of the three types of rice was almost entirely removed, while much of the aleurone layer was remained in the dorsal part. When the bran degree was about 0.10%, a small amount of the dorsal aleurone layer was retained for ‘Daohuaxiang’ and ‘Jihong 6’, while the dorsal aleurone layer of ‘Yexiang’ was completely removed. Therefore, the milling degree required for uniform whitening of brown rice and the processing quality vary with cultivar and grain shape.

Keywords: rice; grain shape; reasonably well milled; milling quality; bran degree; degree of milling

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220609-088

中图分类号: TS210.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 15-0028-12

引文格式:

安红周, 焦悦, 费小吉, 等. 3种不同粒形大米适碾范围内加工品质分析[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 28-39. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220609-088. <http://www.spkx.net.cn>

AN Hongzhou, JIAO Yue, FEI Xiaoji, et al. Analysis of milling quality of reasonably well milled rice with three different grain shapes[J]. Food Science, 2023, 44(15): 28-39. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220609-088. <http://www.spkx.net.cn>

截至2021年,我国水稻总产量连续11年超过2亿t^[1]。我国60%以上的人口将稻米作为主食,巨大的生产量和消费量决定了稻米的重要地位。随着经济不断发展,消费者对大米品质的要求逐渐提高,主要体现在大米的口感及外观方面^[2]。由于糠层的存在,未碾磨的大米口感粗糙且白度较低,提高其加工精度可改善大米的食用品质,提高其感官评分^[3];这就导致生产商为了迎合广大市场要求而过度追求“精、亮、白”的大米,造成大米营养物质大量损失、碎米量增多、能源消耗增加^[4-6]、粮食资源浪费加剧等一系列问题。GB/T 1354—2018《大米》于2019年5月正式施行,关于“精碾”“适碾”的定义及判断标准被正式提出。新国标指导和规范了“适度”加工,而合理适度加工大米正是保证国家食品安全、促进人民健康、节粮减损、提高资源综合利用率的重要手段。现阶段,日本多用糙出白率和白度表征大米的加工精度,我国GB/T 1354—2018则将加工精度定义为“加工后米胚残留以及米粒表面和背沟残留皮层的程度”。

安红周等^[7]探究了碾磨不同时间粳糙米的加工特性,结果显示,‘原阳’大米及‘稻花香’大米适碾条件下的

留皮度分别为2.0%、6.2%,碎米率分别为5.93%、8.83%;且随碾磨时间的延长,中粒形‘稻花香’的碎米率高于短粒形‘原阳’大米。陈会会^[8]和杨柳^[9]分别对粳米和籼米的适度碾制加工技术及品质指标进行研究,结果表明,随加工精度的提高,大米留胚率、留皮度及破裂强度逐渐降低,白度与碎米率呈现上升趋势;且不同品种大米达到同一碾磨精度所需时间不同,短粒形糙米皮层较中粒形糙米更难被碾除。谢丹等^[10]的研究结果表明,稻谷的长宽比即粒形对留胚率影响显著,同一加工条件下,短粒稻米的留胚率大于中粒及长粒。任海斌等^[11]研究了籼米留皮度与加工品质的关系,结果显示,米粒长宽比(即粒形)与留皮度具有显著的相关性。近年来,已有较多关于不同品种稻米适度碾制加工精度的确定及对不同加工精度大米加工品质的研究,然而对不同粒形大米在适碾范围内加工品质的研究鲜有报道,亦缺少系统的分析与比较研究。因此,本实验以短、中、长3种不同粒形的糙米为原料,对适碾加工的大米与常规精碾大米的加工品质进行分析和比较,以期根据其中差异和规律为稻米适度加工提供精准数字化依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

‘稻花香’糙米产自黑龙江省；‘吉宏6’糙米产自吉林省；‘野香优莉丝’（以下简称‘野香’）糙米产自江西省，3种糙米原料均由益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司提供。

伊红Y-亚甲基蓝染色剂 北京东孚久恒仪器技术有限公司；无水乙醇、石油醚（沸程30%~60%） 天津市天力化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

TM05C砂辊碾米机、CBS550AS(2)精米机、JMJT-12大米加工精度检测仪、SATAKE MMID精白度计 佐竹机械（苏州）有限公司；碎米分离器 台州市新恩精密粮仪有限公司；游标卡尺 台州市新恩精密粮仪有限公司；TA-XT plus质构仪 英国SMS公司；SZX16体视显微镜 日本奥林巴斯公司；TESCAN MIRA LMS扫描电子显微镜 泰思肯（中国）有限公司。

1.3 方法

1.3.1 糙米处理

糙米过筛（18目），除去稻谷、稻壳和大杂等，挑出不完整粒，得到干净糙米，存放于4℃冰箱。

1.3.2 原料糙米特性的测定

1.3.2.1 原料糙米粒长度、宽度和厚度的测定

参照GB/T 1354—2018，分别对3种原料糙米的长度、宽度、厚度进行测定。

1.3.2.2 原料糙米横截面微观结构检测

选取‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’糙米，共计3种样品，挑选表面完整、形态完好且能代表该品种大米特点的籽粒10粒。为尽可能保证微观结构不被破坏，徒手在‘野香’糙米粒靠近中部的地方将其折断并用于观察，将折断后米粒的另一侧用手术刀切断，由此得到约2 mm厚的米粒横截面样品，将刀切的一侧粘在导电胶上并将其置于扫描电子显微镜下，不喷金、在15 kV加速电压下，借助背散射电子成像（back scattered electron imaging, BSE）观察样品在100×视野下的完整横截面图像和2 000×视野下的背部和腹部局部图像。因‘稻花香’和‘吉宏6’糙米粒较短粗，难以徒手掰断，故先用手术刀在米粒表面轻划一下，再徒手掰断，后续操作同‘野香’。

1.3.3 大米样品的碾制

碾米实验开始前3种糙米原料均储存在4℃的冷库中，‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的水分质量分数分别为（14.26±0.01）%、（14.19±0.06）%和（13.33±0.04）%。‘稻花香’与‘吉宏6’均为粳米，故采用粳米的工艺碾制方式，即砂-铁碾米机结合碾米：

砂辊碾米机开糙后利用铁辊碾米机碾制；‘野香’为籼米，采用籼米的碾制方式，即采用砂辊碾米机进行碾制。

一次性取200.00 g ‘稻花香’和‘吉宏6’净糙米，分别用TM05C砂辊碾米机（砂号40#）（转速1 060 r/min）碾23 s及18 s进行开糙，得到碾减率分别为2.50%和2.00%的米样；经砂辊碾米机开糙后，用CBS550AS(2)精米机碾制，一次性取1 000.00 g，碾磨时间5 min，调整压力得到目标碾减率分别为2.00%、4.00%、6.00%、8.00%、10.00%、12.00%、14.00%左右的样品。一次取200.00 g ‘野香’净糙米，使用佐竹（TM05C）碾米机（砂号40#）（转速1 060 r/min）碾制不同时间，得到不同碾减率的样品。碾制的大米过筛去糠粉（18目），保存于密封袋中，置于4℃冰箱存放。

1.3.4 加工品质的分析

1.3.4.1 留皮度的测定及样品选取

参照GB/T 5502—2018《粮油检验 大米加工精度检验》中伊红Y-亚甲基蓝染色剂染色法进行分析，选取染色前/后的完整米粒若干（选取不同碾磨压力档位制得留皮度分别为96.75%（糙米）、60.35%、35.85%、20.75%、13.10%、7.05%、3.40%、2.45%、2.10%、1.95%、0.45%和0.10%的‘稻花香’米样，留皮度分别为96.65%（糙米）、34.50%、6.05%、2.50%、2.05%、1.23%、0.55%、0.30%、0.25%和0.10%的‘吉宏6’米样；选取不同碾磨时间制得留皮度分别为97.72%（糙米）、46.93%、8.94%、6.00%、3.02%、2.21%、1.20%、0.75%、0.51%、0.31%、0.30%和0.10%的‘野香’米样），将其均匀放置/散落在载玻片上，置于体视显微镜下进行观测拍照；将染色晾干后的试样放入JMJT-12大米加工精度检测仪器内，采集影像，并进行自动计算和分析，测得其留皮度，测定两次取平均值。分别选取糙米、适碾米和精碾米进行显微观察，‘稻花香’留皮度96.75%（糙米）、2.45%（适碾米）和0.10%（精碾米），‘吉宏6’留皮度96.65%（糙米）、2.05%（适碾米）和0.25%（精碾米），‘野香’留皮度97.72%（糙米）、2.21%（适碾米）和0.31%（精碾米）各3个样品，共计9个样品应用BSE进行微观扫描检测，实验操作同1.3.2.2节。

1.3.4.2 碾减率的测定

当旨在了解样品在加工过程中碾减率的变化规律或样品碎米量未超过国家规定的同等级大米的碎米标准时，在计算时可不考虑碎米的因素；但不同粒形糙米的原料特性存在差异，在表示加工精度时，将碎米考虑在内可更准确地了解其在加工过程中对米样产生的影响；因此，应根据实际情况选择碾减率/除碎碾减率来表示大米的加工精度。碾减率参考文献[12]测定，（简单）碾减率和除碎碾减率分别按式（1）、（2）进行计算。

$$(简单) 碾减率/\% = \frac{糙米质量/g - 碾磨后大米质量/g}{糙米质量/g} \times 100 \quad (1)$$

$$除碎碾减率/\% = \frac{m_1(1-x-\beta_1) - m_2(1-y-\beta_2)}{m_1(1-x-\beta_1)} \times 100 \quad (2)$$

式中： m_1 为碾米机进机物料流量/(kg/h)； m_2 为碾米机出机物料流量/(kg/h)； x 为进机糙米中的含杂百分率/%； y 为出机米中的含杂百分率/%； β_1 为进机物料中超指标的碎米率/%； β_2 为出机物料中超指标的碎米率/%。

超指标的碎米率：超出GB/T 1354—2018规定等级大米碎米率部分的碎米含量称为超指标的碎米率。

1.3.4.3 糙出白率的测定

糙出白率可表征包括碎米在内的全部米粒的整体质量减少程度；除碎糙出白率则可排除掉碎米量的影响，也可与糙出白率形成对比，了解碎米率对糙出白率的影响规律。参照丰益（上海）生物技术研发中心有限公司糙出白率的测定方法，3次测定取平均值，按式（3）、（4）分别计算糙出白率和除碎糙出白率。

$$糙出白率/\% = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

式中： m_1 为随机挑选进机整糙米1 000粒的质量/g； m_2 为随机挑选出机整糙米1 000粒的质量/g。

$$除碎糙出白率/\% = \frac{m_2(1-y-\beta_2)}{m_1(1-x-\beta_1)} \times 100 \quad (4)$$

式中： m_1 为碾米机进机物料流量/(kg/h)； m_2 为碾米机出机物料流量/(kg/h)； x 为进机糙米中的含杂百分率/%； y 为出机米中的含杂百分率/%； β_1 为进机物料中超指标的碎米率/%； β_2 为出机物料中超指标的碎米率/%。

1.3.4.4 碎米率的测定

参照GB/T 5503—2009《粮油检验 碎米检验法》测定碎米率。

1.3.4.5 留胚率的测定

随机取100粒大米，挑选出胚芽保留程度在半胚以上的米粒，并记录其粒数为 n ，3次测定后取平均值。按式（5）计算留胚率。

$$留胚率/\% = \frac{n}{100} \times 100 \quad (5)$$

1.3.4.6 白度的测定

白度测定采用SATAKE MMID精白度计，使用前首先校正仪器，茶色校正板白度为0，白色校正板白度为100，3次测定取平均值^[13]。

1.3.4.7 破裂强度的测定

挑取形状均一、无明显裂纹的整糙米若干，选用P36/R探头，测前、测中、测后速率分别为2.00、0.10 mm/s及10.00 mm/s，应变30%，用100粒大米做重复实验，取平均值^[14]。

1.4 数据处理与分析

采用Origin 2021软件作图，采用SPSS 25.0软件对数据进行方差分析、显著性分析（单因素方差分析法）及相关性分析（Pearson法），数据结果以平均值±标准偏差表示，以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 3种原料糙米的原料特性

2.1.1 原料糙米的粒形

按秦岭-淮河线可将我国水稻产区分为两个主要区域：南部稻区主产籼稻，且籼稻与粳稻并存；而北部稻区主产粳稻。如表1所示，根据国际大米分类标准CODEX STAN 198-1995方法1对籽粒长宽比进行判定，‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’分别属中粒形、短粒形和长粒形米，其地域和粒形特征均具有代表性。

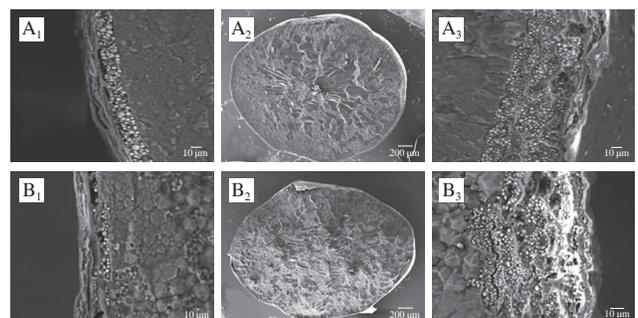
表1 3种原料糙米特性

Table 1 Characteristics of three kinds of raw brown rice

| 品种 | 产地 | 长度/mm | 宽度/mm | 厚度/mm | 长宽比 | 粒形 | 水分质量分数/% |
|-------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|----|------------|
| ‘稻花香’ | 黑龙江 | 6.75±0.17 | 2.54±0.40 | 2.03±0.08 | 2.65±0.06 | 中 | 14.19±0.06 |
| ‘吉宏6’ | 吉林 | 4.73±0.53 | 2.59±0.14 | 1.80±0.14 | 1.83±0.85 | 短 | 12.92±0.03 |
| ‘野香’ | 江西 | 6.98±0.41 | 1.50±0.10 | 1.28±0.06 | 4.67±0.45 | 长 | 13.33±0.04 |

2.1.2 原料糙米横截面微观结构

图1为‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’糙米横截面、腹部和背部皮层的扫描电子显微镜图，糙米横截面在图中清晰可见，边缘并不光滑，不同部位的皮层和糊粉层有着明显差别。‘稻花香’和‘吉宏6’背部糊粉层较厚，约50~60 μm；腹部的糊粉层较薄，约15~20 μm，与王忠等^[15]的研究结果一致；而长粒‘野香’背部的糊粉层较中短粒‘稻花香’和‘吉宏6’薄^[16]，约30~45 μm。糊粉层厚度与稻米品种、籽粒部位、种植环境等因素有关^[17]，同样的加工条件，‘野香’会更快碾到胚乳部分。利用扫描电子显微镜进行背散射电子成像时，原子序数越大，该区域的图像越明亮^[18]，表明该区域的矿物质含量越多；糊粉层中有许多明亮的白点，表明该区域含有大量的矿物质元素。由图1可以看出，胚乳较皮层和糊粉层结构更加致密，因此，碾磨胚乳需要更大的压力/更长的时间。





A. ‘稻花香’；B. ‘吉宏6’；C. ‘野香’；下标1.糙米腹部(2 000×)；下标2.糙米横截面(100×)；下标3.糙米背部(2 000×)。

图1 ‘稻花香’ ‘吉宏6’ 和 ‘野香’ 糙米微观结构

Fig. 1 Microscopic changes of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ brown rice

2.2 3种原料糙米加工品质的变化规律

2.2.1 留皮度的变化规律

2.2.1.1 大米外观变化

‘稻花香’ ‘吉宏6’ 和 ‘野香’ 经伊红Y-亚甲基蓝染色剂染色前后不同碾磨程度大米的外观变化分别如图2、3所示，染色后米粒的皮层和胚为蓝绿色，胚乳部分为紫红色。不同大米的外观品质具有显著性差异^[19]，由图2、3可见，在适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内，随着碾磨程度的增加，‘稻花香’ ‘吉宏6’ 和 ‘野香’ 大米表面的皮层均逐渐减少，胚乳逐渐露出，米粒颜色也逐渐变得洁白；留皮度为2.0%左右时，‘稻花香’ 的米胚几乎完全被碾除，而‘吉宏6’ 和 ‘野香’ 的胚芽保留程度仍较高。

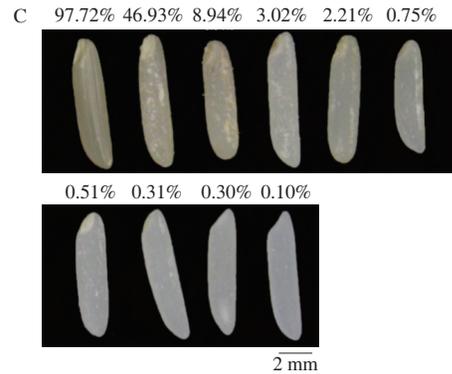
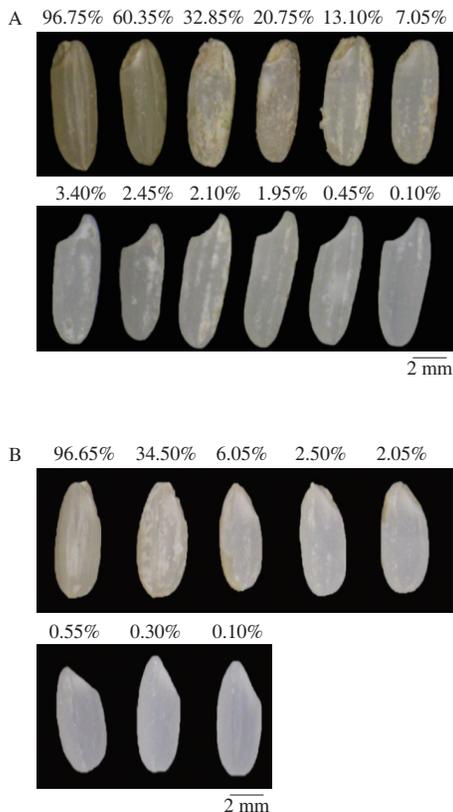
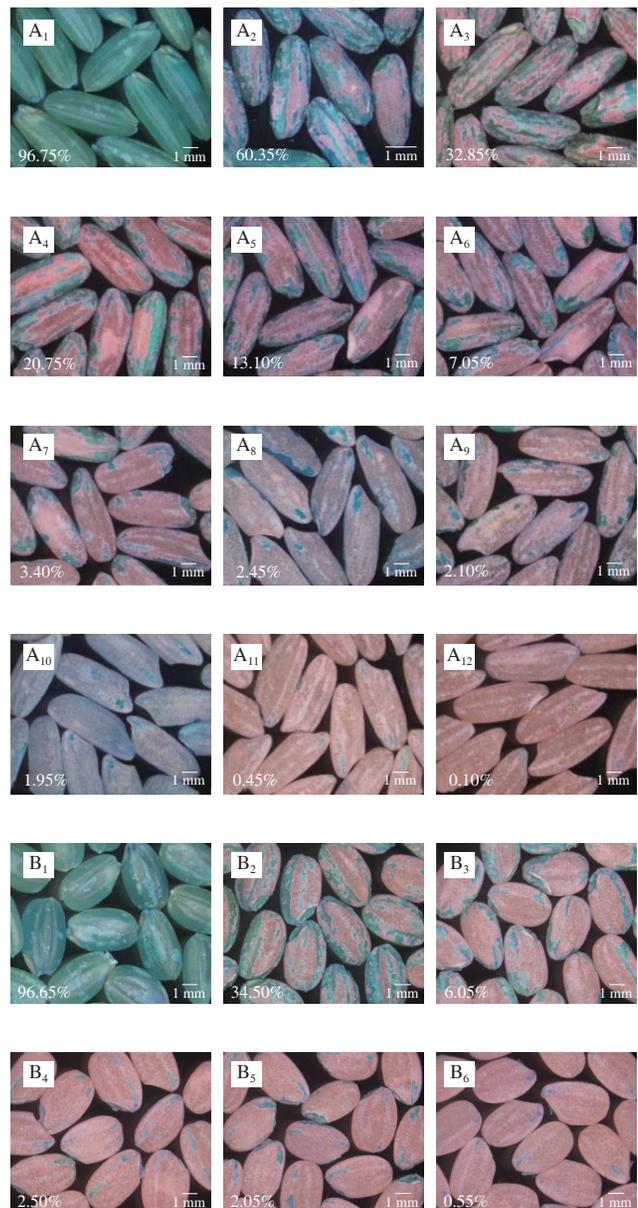
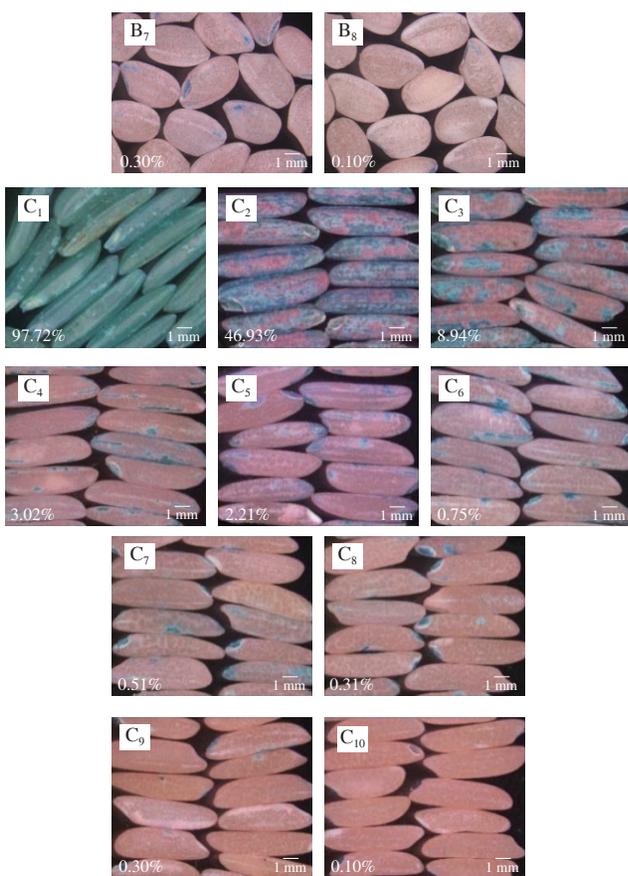


图2 染色前不同留皮度‘稻花香’(A) ‘吉宏6’(B) 和 ‘野香’(C) 大米外观品质变化

Fig. 2 Changes in appearance quality of ‘Daohuaxiang’ (A), ‘Jihong 6’ (B) and ‘Yexiang’ (C) rice with different bran degrees before dying





图中左下角数据表示留皮度。

图3 ‘稻花香’ (A) 、“吉宏6” (B) 和 ‘野香’ (C) 染色后不同留皮度大米外观品质变化

Fig. 3 Changes in appearance quality of ‘Daohuaxiang’ (A), ‘Jihong 6’ (B) and ‘Yexiang’ (C) rice with different bran degrees after dyeing

2.2.1.2 碾磨压力/时间对留皮度的影响

通过调节铁辊碾磨压力碾制不同加工精度的‘稻花香’和‘吉宏6’大米样品；不同加工精度的‘野香’大米样品则通过调节砂辊碾磨时间制得。图4、5分别为‘稻花香’和‘吉宏6’碾磨压力与留皮度以及‘野香’碾磨时间与留皮度关系的拟合曲线。‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’碾磨压力/时间与留皮度的拟合方程均为指数衰减方程， R^2 分别为0.987 4、0.987 1和0.996 4。碾磨压力从0档增加至0.75档时，‘稻花香’留皮度从20.75%降低到2.10%，但碾磨压力从0.75档增加至3档时，留皮度仅从2.10%降低到0.10%；‘吉宏6’碾磨压力由0档增加1.25档时，留皮度从6.05%降低到2.05%；碾磨压力由1.25档增加8.50档后，留皮度从2.05%降低到0.10%；‘野香’碾磨时间为80 s时，留皮度从97.72%降低到2.21%，而后碾磨时间延长至360 s时，留皮度仅从2.21%降低到0.10%。结果表明，大米加工到适碾范围（留皮度为7.0%~2.0%）相比加工至精碾程度（留皮度低于2.0%）而言，所需要的碾磨压力更小、碾磨时间更短。Lamberts等^[20]发现，糠层的硬度从外向内逐渐下降，

而胚乳不同部位（外胚乳和中胚乳）硬度接近；因此，在碾磨前期，3种大米的留皮度下降速率较快且碾磨压力较小、时间较短；当大米皮层几乎完全被碾去时，再增加压力或延长时间，则会碾磨掉胚乳部分，造成粮食浪费。在碾制GB/T 1354—2018规定留皮度为2.0%~7.0%的适碾范围米样时，两种粳米的压力设置差异明显，‘稻花香’压力档位需设置为0.37~0.75档，而‘吉宏6’需要设置为0.5~1.25档；综上，不同粒形大米达到适碾范围所需要的碾磨压力不同，短粒形（‘吉宏6’）糙米较中粒形（‘稻花香’）糙米而言所需碾磨压力更大。

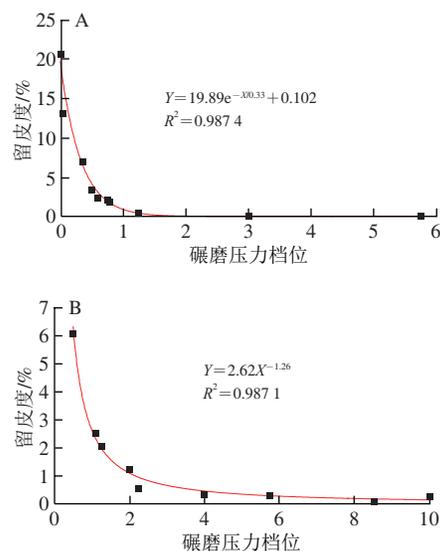


图4 ‘稻花香’ (A) 、“吉宏6” (B) 留皮度随碾磨压力的变化
Fig. 4 Variation in bran degree of ‘Daohuaxiang’ (A) and ‘Jihong 6’ (B) rice with milling pressure

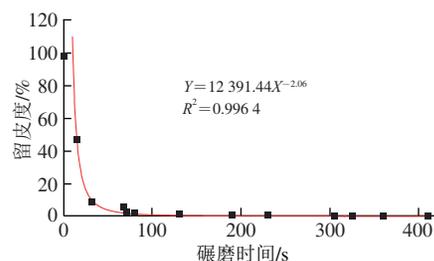
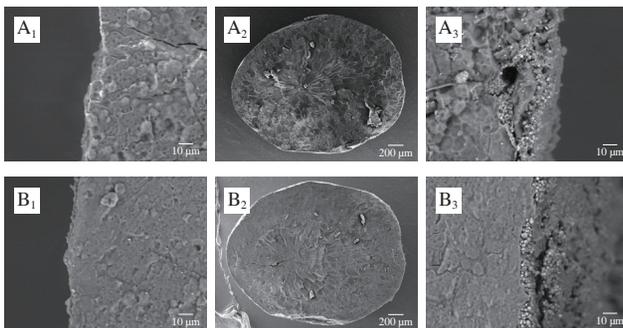


图5 ‘野香’ 留皮度随碾磨时间的变化
Fig. 5 Variation in bran degree of ‘Yexiang’ rice with milling time

2.2.1.3 不同留皮度大米横截面及皮层结构观察分析

图6~8为‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’不同留皮度大米横截面的微观结构图像，均选取留皮度在适碾、精碾范围内的米样进行观测。随着加工精度的增加，糙米的皮层逐渐被破坏。Ren Haibin等^[21]的研究表明，米粒两侧的表面皮层很容易研磨，而米粒的腹部和背部表面皮层则较难研磨。如图1所示，糙米的背部和腹部皮层结构完整、糊粉层留存完整，糙米表面光滑，

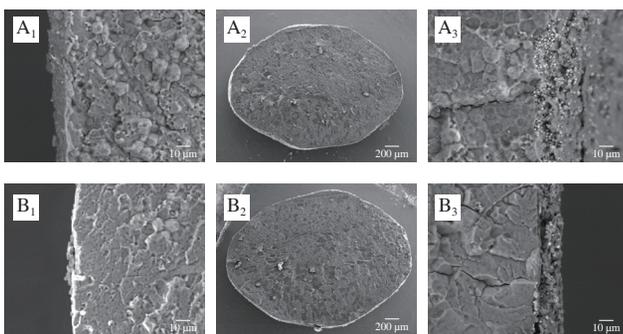
米粒背部和腹部可明显区分。当留皮度大约为2.00%时,3种大米腹部果皮、种皮和糊粉层已被完全去除,籽粒背部的果皮和种皮也完全去除,但保留有较多的糊粉层;‘稻花香’和‘吉宏6’籽粒背部和腹部由于背沟的存在,仍可以较好地区分(图6A₁、A₃和图7A₁、A₃);‘野香’籽粒的背沟已被碾磨平滑,背部和腹部难以用肉眼分辨(图8A₁、A₃);表明长粒形籼米的背沟更易被碾除。当留皮度接近于0.10%时,‘稻花香’和‘吉宏6’背部仍有少量的糊粉层(图6B₃和图7B₃),而‘野香’大米的背部糊粉层已被完全碾除(图8B₃),但米粒表面会有少量糊粉层颗粒残留^[22];‘稻花香’的背沟仍可以清楚看到,‘吉宏6’和‘野香’的背沟已被磨平,不易区别籽粒的背部和腹部。由此可见,粒形较短的粳米(‘稻花香’‘吉宏6’)较长粒形籼米(‘野香’)更难去除糊粉层。



A.留皮度2.45%米样; B.留皮度0.1%米样。下标1.米样腹部(2 000×);下标2.米样横截面(100×);下标3.米样背部(2 000×);图8同。

图6 ‘稻花香’不同留皮度大米微观变化图像

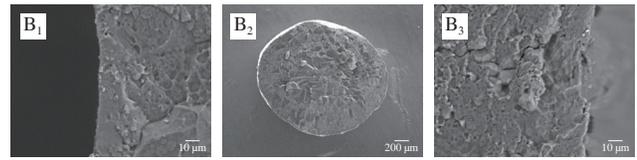
Fig. 6 Microscopic changes of ‘Daohuaxiang’ rice with different bran degrees



A.留皮度2.05%米样; B.留皮度0.25%米样。下标1.米样腹部(2 000×);下标2.米样横截面(90×);下标3.米样背部(2 000×)。

图7 ‘吉宏6’不同留皮度大米微观变化图像

Fig. 7 Microscopic changes of ‘Jihong 6’ rice with different bran degrees



A.留皮度2.21%米样; B.留皮度0.31%米样。

图8 ‘野香’不同留皮度大米微观变化图像

Fig. 8 Microscopic changes of ‘Yexiang’ rice with different bran degrees

2.2.2 碾减率的变化规律

3种大米不同碾减率与留皮度的关系如图9所示,随着留皮度的降低,碾减率总体呈上升趋势。在糙米中,皮层约占籽粒质量的5.0%~7.0%,胚约占2.0%~3.5%,胚乳约占89.0%~92.0%,皮层与胚合称为米糠。Roberts^[23]指出,糙米经碾磨除去8%的外糠层,再经过抛光除去2%的内糠层即得到精白米。刘静静等^[24]通过研究发现,碾磨加工前期,糠层容易被去除,留皮度变化程度较大,随着加工程度的提高,留皮度逐渐降低,变化幅度也减小。在GB/T 1354—2018适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内,‘稻花香’的碾减率为(8.15±0.08)%~(11.13±0.04)%,‘吉宏6’的碾减率为(1.04±0.05)%~(6.07±0.07)%,‘野香’的碾减率为(5.82±0.12)%~(6.00±0.07)%;适碾范围内,‘吉宏6’‘稻花香’和‘野香’的碾减率变化幅值分别为5.03%、2.98%和0.18%,表明对糙米进行适度碾制加工时并非粒形较长的大米碾减率变化更大。

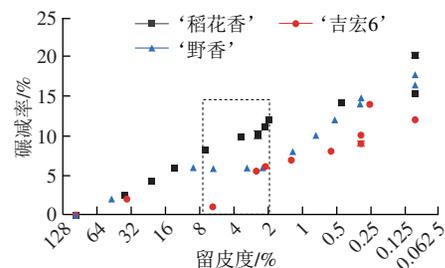


图9 ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’碾减率的变化

Fig. 9 Changes in milling degree of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ rice

2.2.3 糙出白率的变化规律

图10为‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’糙出白率随留皮度的变化规律,随着留皮度的降低,3种大米的糙出白率总体均呈下降趋势,这一趋势与糙米碾磨过程中糠皮的去除有关。糙出白率可反映大米的加工精度与碾白程度,当糠层已基本被除去后,再碾磨掉胚乳则会影响出米率^[25]。刘厚清等^[26]研究发现,加工精度与出米率相关,而且加工精度的提高会使出米率显著下降。在GB/T 1354—2018规定的大米适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内,‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’的

糙出白率分别为(94.02±1.19)%~(92.64±0.11)%、(95.91±0.61)%~(93.17±0.78)%和(94.11±0.12)%~(93.90±0.20)%，分别降低了1.38、2.74、0.21个百分点；由此可见，在适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内，相比于‘稻花香’和‘吉宏6’，长粒形‘野香’糙出白率的变化率最小。与适碾范围大米相比，若碾至精碾程度(留皮度为0.10%)，‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’的糙出白率分别降低4.19~2.81、7.02~4.28、10.65~10.44个百分点，糙出白率降低速度更快，会导致出米率下降及粮食资源浪费。

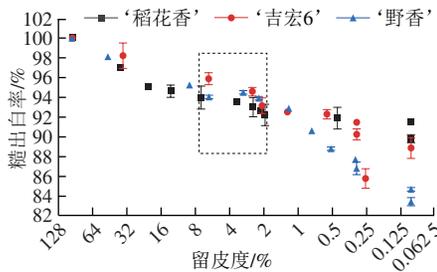


图10 ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’糙出白率的变化

Fig. 10 Changes in whitening rate of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ rice

2.2.4 碎米率的变化规律及其对碾减率和糙出白率的影响

2.2.4.1 碎米率的变化规律

碎米率随留皮度的变化规律如图11所示，‘稻花香’碎米率较高，当留皮度低于7.05%时，碎米率随留皮度增加而提升较快，而后减慢；‘吉宏6’碎米率总体较低，变化趋势较缓；‘野香’碎米率最高，但在留皮度为8.94%~2.21%范围内变化趋势较缓，随后升高；留皮度越低，说明其加工精度越高；苏慧敏等^[27]的研究结果也表明较高的加工精度会导致碎米率提高，从而降低整精米率。‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’原料的初始碎米率分别为3.03%、0.00%和10.07%；在GB/T 1354—2018规定的大米适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内，‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的碎米率较原始碎米率分别增加了5.24~10.56、0.68~0.93、4.38~4.59个百分点；碎米率增加幅值分别为5.32%、0.25%和0.21%。由此可见，在适碾范围内，‘稻花香’碎米率增加最多，‘吉宏6’与‘野香’碎米增加率均较小；‘野香’虽属长粒形米，但其在适碾范围内的碎米变化率很小。与适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)大米相比，若碾至精碾程度(留皮度为0.10%)时，‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的碎米率则会分别增加10.36~4.77、1.85~1.60、10.05~9.84个百分点。较适碾范围而言，留皮度由2.0%降低至0.10%时，‘稻花香’的碎米变化率减小，而‘吉宏6’与‘野香’的

碎米变化率均有所增大，尤以‘野香’碎米率增加幅度最多。因此，在大米皮层几乎完全被碾除后再提高加工精度会导致碎米率显著上升，但碎米率的变化幅度与粒形有关；建议长粒形‘野香’在碾磨加工过程中更多采用适碾工艺以提高产品的整精米率；相对短粒型的‘吉宏6’而言，使用同型铁辊米机进行加工时，中粒型的‘稻花香’增碎更多；无论何种粒形的糙米，在碾磨加工过程中必然会产生碎米，但可以通过控制加工精度及改善加工工艺减少碎米的产生。

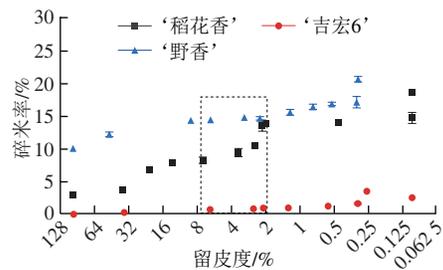
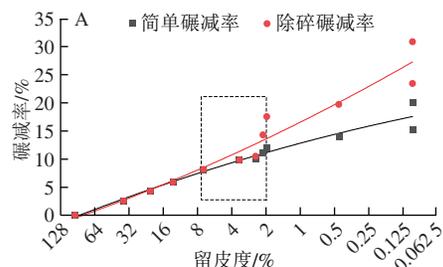


图11 ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’碎米率的变化

Fig. 11 Changes in broken rice rate of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ rice

2.2.4.2 碎米率对碾减率的影响

由图12可知，3种大米的简单碾减率和除碎碾减率均随留皮度的降低逐渐增加，与前文所述碾磨压力的增加密切相关；随着加工精度的提高，超指标的碎米率对‘稻花香’与‘野香’碾减率的影响增加，而‘吉宏6’则不存在超指标的碎米率的影响；与适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)大米相比，精碾(留皮度低于2.0%)过程中超指标的碎米率对碾减率的影响更大。参照GB/T 1354—2018规定的大米碎米率范围(精碾：粳米碎米总量不高于10.0%，籼米碎米总量不高于15%)，‘稻花香’在留皮度为0.10%时，18.63%超指标的碎米率会导致简单碾减率与除碎碾减率有10.89%的差异；‘吉宏6’糙米原料含碎率低，加工过程中碎米产生少，且碎米率均符合GB/T 1354—2018的要求，出米率高；而对于长粒形的‘野香’，原料糙米碎米率就高达10.07%，精碾情况下，超指标的碎米率最高可达14.97%；因此，对‘稻花香’及‘野香’进行适度加工工艺调整有利于提升大米品质。



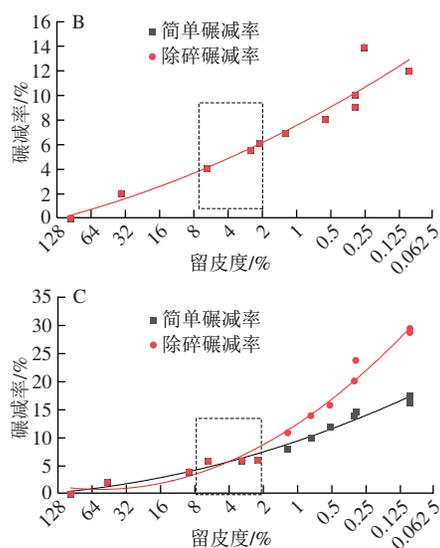


图12 ‘稻花香’ (A)、‘吉宏6’ (B) 和‘野香’ (C) 简单/除碎碾减率的变化

Fig. 12 Changes in milling degree of ‘Daohuaxiang’ (A), ‘Jihong 6’ (B) and ‘Yexiang’ (C) rice

2.2.4.3 碎米率对糙出白率的影响

由图13可见,随着加工精度的不断提高,‘稻花香’和‘野香’除碎糙出白率的下降速率逐步快于理论糙出白率,而‘吉宏6’的糙出白率则不受超指标的碎米率的影响;‘稻花香’留皮度为2.10%及‘野香’留皮度为2.21%时,除碎糙出白率分别低于理论糙出白率3.19个和0个百分点;留皮度为0.10%左右时,‘稻花香’与‘野香’除碎糙出白率分别低于理论糙出白率10.89个和11.95个百分点;若加工至适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内,‘野香’糙出白率则不受超指标的碎米率的影响,‘稻花香’的糙出白率受到碎米率的影响也较小(0~3.19个百分点);与适碾加工相比,精碾(留皮度低于2.0%)过程中超指标的碎米率对糙出白率的影响更大。精碾范围内,‘稻花香’和‘野香’糙出白率与除碎糙出白率的最大差值分别为10.89%、12.53%;适碾范围的这一差值分别降低至3.19%和0%;而‘吉宏6’在整个加工过程中产生的碎米含量均在GB/T 1354—2018允许范围之内,对糙出白率无显著影响。综上,对粒形较长的‘稻花香’及‘野香’而言,进行适度加工碾制可提高其糙出白率并降低其碎米率对糙出白率的影响。

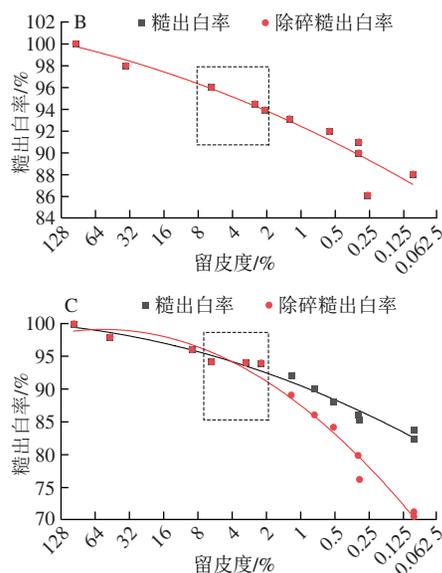
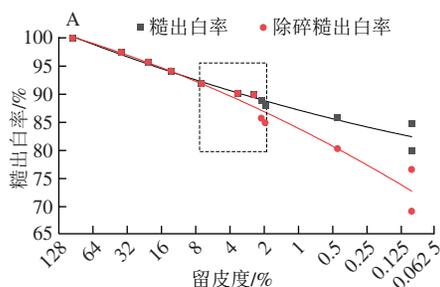


图13 ‘稻花香’ (A)、‘吉宏6’ (B) 和‘野香’ (C) 糙出白率/除碎糙出白率的变化

Fig. 13 Changes in whitening rate of ‘Daohuaxiang’ (A), ‘Jihong 6’ (B) and ‘Yexiang’ (C) rice

2.2.5 留胚率的变化规律

‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’大米留胚率与留皮度的关系如图14所示,3种大米的留胚率均随着留皮度的减小而逐渐降低。在GB/T 1354—2018适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内,‘稻花香’的留胚率为44.00%~16.33%,下降速率最快,‘吉宏6’留胚率为94.67%~80.67%,变化最慢;且‘吉宏6’与‘野香’留胚率均在80%以上。GB/T 1354—2018规定优质粳米中留胚率在20%以下,‘稻花香’在适碾范围内符合此要求的留皮度范围为2.10%~2.45%,‘吉宏6’在适碾范围内达不到此要求;对比同为粳米、加工工艺相同的‘稻花香’,在留皮度高于2.0%范围内,短粒‘吉宏6’留胚率更高,这可能和稻米的粒形有关,这与谢丹等^[10]得出的结论相似。

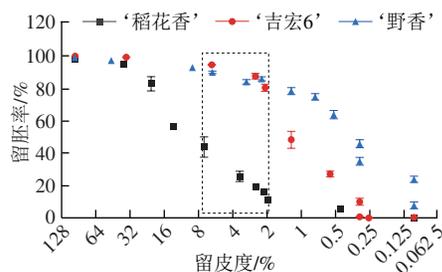


图14 ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’留胚率的变化

Fig. 14 Changes in germ retention rate of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ rice

2.2.6 白度的变化规律

大米外观的光洁度和白度是消费者对大米产品最直观

感受的指标。白度可反映加工精度，且测定方法简单快速，越来越多地被应用于稻米加工品质分析中^[13]，如图15所示，3种粒形大米的初始白度不同，‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’糙米的初始白度分别为17.95%、21.35%和18.41%；‘稻花香’在留皮度7.05%~2.10%时，白度随留皮度降低呈直线增加趋势，随后增加趋势稍缓；‘吉宏6’白度与留皮度之间的变化关系可拟合为一次线性方程， R^2 为0.9973；‘野香’白度则在留皮度低于8.94%后显著增加。在GB/T 1354—2018适碾的留皮度范围（7.0%~2.0%），‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的白度分别为28.65%~35.30%、29.00%~31.80%、23.42%~26.11%，分别增加了6.65、2.80、2.69个百分点，‘野香’白度在适碾范围内随加工精度的变化最小，这可能与3种大米粒形不同有关。安红周等^[28]发明了一种基于白度的大米碾白程度快速判断方法，利用‘原阳’‘稻花香’‘长粒香’‘晚丝苗’‘美香粘’5种大米碾减率与白度数据建立的模型包括：粳米模型：碾减率 $= -0.09766 + 0.00502 \times$ 白度；籼米模型：碾减率 $= -0.10575 + 0.00575 \times$ 白度。根据上述模型，对‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的数据进行验证，结果表明‘野香’和‘稻花香’使用籼米模型拟合效果较好，‘吉宏6’使用粳米模型拟合效果较好，这可能是因‘稻花香’的粒形更接近于传统籼米。

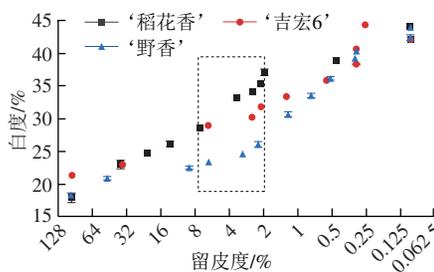


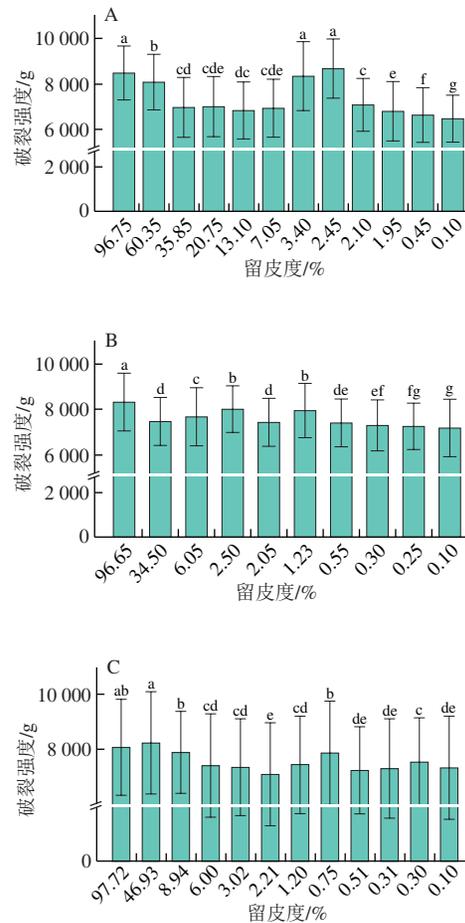
图15 ‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’白度的变化

Fig. 15 Changes in whiteness of ‘Daohuaxiang’, ‘Jihong 6’ and ‘Yexiang’ rice

2.2.7 破裂强度的变化规律

材料实际强度远小于理论强度，材料中总是有很多细小的裂缝和缺陷，由于受到外界的作用力，细小裂缝周围会出现一些应力聚集，当应力积累到一定程度后，细小裂缝就会向外扩张，从而形成裂痕，换言之，裂缝不是沿着整个界面断裂，而是裂缝蔓延的结果^[29]。本实验采用质构仪研究不同加工精度大米的压缩破裂强度变化。由图16可知，‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’的破裂强度最大值分别为8 464.89、8 320.10 g

和8 235.39 g，‘稻花香’的破裂强度最大，可能是因为‘稻花香’糙米的厚度较大^[30]；随着留皮度的降低，破裂强度整体呈降低趋势；通过显著性分析发现，适碾范围内3种大米破裂强度的变化无明显规律；说明加工精度对大米压缩破裂强度无明显影响，与陈会会^[8]和周显青^[30]等的研究结果一致。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图16 ‘稻花香’(A) ‘吉宏6’(B)和‘野香’(C)破裂强度的变化

Fig. 16 Changes in breaking strength of ‘Daohuaxiang’ (A), ‘Jihong 6’ (B) and ‘Yexiang’ (C) rice

2.2.8 适碾范围内加工品质指标的相关性分析

对‘稻花香’‘吉宏6’和‘野香’适碾范围内的加工指标进行相关性分析，结果分别如表2、3、4所示。大米糠层的保留程度可用留皮度来表征^[11]，留皮度的变化也可衡量加工精度水平。与‘稻花香’留皮度呈极显著相关的变量有碾减率、白度、碎米率、留胚率和糙出白率 ($P < 0.01$) (表2)；与‘吉宏6’留皮度极显著相关的变量有碾减率、白度、碎米率、留胚率 ($P < 0.01$)，与留皮度呈显著相关的变量有糙出白率 ($P < 0.05$)

(表3);与‘野香’大米留皮度显著相关的变量有碾减率和留胚率($P<0.05$),与其极显著相关的变量有白度($P<0.01$)(表4)。在适碾范围留皮度可较好地表征3种大米的加工品质。

表2 ‘稻花香’加工指标的相关性

Table 2 Correlation among processing indexes of ‘Daohuaxiang’ rice

| 指标 | 留皮度 | 碾减率 | 白度 | 碎米率 | 留胚率 | 糙出白率 | 破裂强度 |
|------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 留皮度 | 1 | -0.958** | -0.995** | -0.772** | 0.962** | 0.898** | -0.462 |
| 碾减率 | | 1 | 0.982** | 0.909** | -0.933** | -0.874** | 0.195 |
| 白度 | | | 1 | 0.830** | -0.961** | -0.898** | 0.370 |
| 碎米率 | | | | 1 | -0.781** | -0.777** | -0.197 |
| 留胚率 | | | | | 1 | 0.932** | -0.411 |
| 糙出白率 | | | | | | 1 | -0.341 |
| 破裂强度 | | | | | | | 1 |

注:**.极显著相关($P<0.01$);*.显著相关($P<0.05$)。下同。

表3 ‘吉宏6’加工指标的相关性

Table 3 Correlation among processing indexes of ‘Jihong 6’ rice

| 指标 | 留皮度 | 碾减率 | 白度 | 碎米率 | 留胚率 | 糙出白率 | 破裂强度 |
|------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| 留皮度 | 1 | -0.985** | -0.897** | -0.852** | 0.891** | 0.777* | 0.138 |
| 碾减率 | | 1 | 0.940** | 0.883** | -0.945** | -0.816** | -0.292 |
| 白度 | | | 1 | 0.931** | -0.972** | -0.873** | -0.488 |
| 碎米率 | | | | 1 | -0.867** | -0.828** | -0.488 |
| 留胚率 | | | | | 1 | 0.909** | 0.503 |
| 糙出白率 | | | | | | 1 | 0.444 |
| 破裂强度 | | | | | | | 1 |

表4 ‘野香’加工指标的相关性

Table 4 Correlation among processing indexes of ‘Yexiang’ rice

| 指标 | 留皮度 | 碾减率 | 白度 | 碎米率 | 留胚率 | 糙出白率 | 破裂强度 |
|------|-----|---------|----------|--------|---------|--------|--------|
| 留皮度 | 1 | -0.670* | -0.907** | -0.628 | 0.760* | 0.000 | 0.100 |
| 碾减率 | | 1 | 0.648 | 0.306 | -0.607 | 0.124 | 0.098 |
| 白度 | | | 1 | 0.302 | -0.465 | -0.358 | 0.020 |
| 碎米率 | | | | 1 | -0.777* | 0.433 | -0.389 |
| 留胚率 | | | | | 1 | -0.519 | 0.038 |
| 糙出白率 | | | | | | 1 | 0.196 |
| 破裂强度 | | | | | | | 1 |

3 结论

通过对不同粒形大米的加工品质进行分析研究可知,在GB/T 1354—2018规定的适碾范围(留皮度7.0%~2.0%)内,‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’碾减率的变化幅值分别为2.98%、5.03%及0.18%,碎米率变化幅值分别为5.32%、0.25%、0.21%,糙出白率变化幅值分别为1.38%、2.74%、0.21%,白度变化幅值分别为6.65%、2.80%及2.69%,三者中粒形最长的‘野香’在适碾范围内碾减率、碎米率、糙出白率及白度变化量最小;适碾范围内‘稻花香’‘吉宏6’及‘野香’的留胚率分别为44.00%~16.33%、94.67%~80.67%和90.00%~86.00%,‘吉宏6’及‘野香’的米胚保留程度均高于80%,或可用作胚芽米的研究原料。此外,籽粒厚度最大的‘稻花

香’的破裂强度最大值高于‘吉宏6’和‘野香’。精碾范围内,‘稻花香’和‘野香’糙出白率与除碎糙出白率的最大差值分别为10.89%、12.53%;适碾范围的这一差值分别降低至3.19%和0%;而‘吉宏6’在整个加工过程中产生的碎米含量均在GB/T 1354—2018允许范围之内,对糙出白率无显著影响。综上,不同粒形的‘吉宏6’‘稻花香’及‘野香’进行适度加工碾制时,既能够提高其糙出白率,又可以保留部分米胚及糠层中的营养成分,对短粒形‘吉宏6’来讲这一优势更为突出。适度加工不仅可以降低大米产品的碎米率,减少粮食资源的浪费,还可降低过度加工带来的能源损耗,有利于推动大米加工产业可持续健康发展。

参考文献:

- [1] 徐春春,纪龙,陈中督,等. 2021年我国水稻产业形势分析及2022年展望[J]. 中国稻米, 2022, 28(2): 16-19.
- [2] 赵志浩,邓媛元,魏振承,等. 大米适度加工和副产物综合利用现状及展望[J]. 广东农业科学, 2020, 47(11): 144-152. DOI:10.16768/j.issn.1004-874x.2020.11.016.
- [3] 孙宇,徐文,余平,等. 加工精度对大米理化特性、糊化特性以及食用品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(8): 29-33. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2021.08.009.
- [4] NABAVI-PELESARAEI A, RAFIEE S, MOHTASEBI S S, et al. Assessment of optimized pattern in milling factories of rice production based on energy, environmental and economic objectives[J]. Energy, 2018, 169(15): 1259-1273. DOI:10.1016/j.energy.2018.12.106.
- [5] MONKS J L F, VANIER N L, CASARIL J, et al. Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 30(2): 73-79. DOI:10.1016/j.jfca.2013.01.009.
- [6] AHMAD U, ALFARO L, YEBOAH-AWUDZI M, et al. Influence of milling intensity and storage temperature on the quality of Catahoula rice (*Oryza sativa*, L.)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 386-392. DOI:10.1016/j.lwt.2016.09.014.
- [7] 安红周,陈会会,薛义博,等. 不同碾磨时间对粳糙米加工特性的影响研究[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 169-173. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2019.08.031.
- [8] 陈会会. 粳米适度碾制加工技术与品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 14-25. DOI:10.27791/d.cnki.ghegy.2020.000374.
- [9] 杨柳. 粳米适度碾制加工技术与品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021: 9-25. DOI:10.27791/d.cnki.ghegy.2021.000364.
- [10] 谢丹,金芝苹,葛志刚. 加工精度对大米品质和蒸煮特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(10): 15-18. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2021.10.005.
- [11] 任海斌,任晨刚,黄金,等. 不同加工精度粳米留皮度变化规律及其与加工品质相关性研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(11): 90-94. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2020.11.025.
- [12] SHAMS-UD-DIN M D, BHATTACHARYA K R. On the meaning of the degree of milling of rice[J]. International Journal of Food Science Technology, 1978, 13(2): 99-105. DOI:10.1111/j.1365-2621.1978.tb00783.x.

- [13] 李素梅. 白度计在精米加工中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 2000(5): 15. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.2000.05.007.
- [14] 周显青, 张玉荣, 褚洪强, 等. 糙米机械破碎力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 255-262. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.18.036.
- [15] 王忠, 顾蕴洁, 郑彦坤, 等. 水稻胚乳细胞发育的结构观察及其矿物质元素分析[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(6): 693-705. DOI:10.3969/j.issn.1001-7216.2012.06.009.
- [16] 张文虎. 关于稻麦糊粉层发育的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008: 24-25. DOI:10.7666/d.y1261694.
- [17] ROSARIO A, BRIONES V P, VIDAL A J, et al. Composition and endosperm structure of developing and mature rice kernel[J]. Cereal Chemistry, 1968, 45(3): 225-235.
- [18] 冯善娥, 高伟建. 扫描电镜中背散射电子成像功能的应用[J]. 分析测试技术与仪器, 2015, 21(1): 54-57. DOI:10.16495/j.1006-3757.2015.01.011.
- [19] 李枝芳, 姚轶俊, 张磊, 等. 不同品种大米组分含量与米饭加工品质特性的关系[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 35-41. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191029-327.
- [20] LAMBERTS L, BIE E D, VANDEPUTTE G E, et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice[J]. Food Chemistry, 2007, 99(4): 1496-1503. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.11.042.
- [21] REN Haibin, QI Shengmin, ZHANG Lianhui, et al. Variations in the appearance quality of brown rice during the four stages of milling[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103344. DOI:10.1016/J.JCS.2021.103344.
- [22] 任海斌, 亓盛敏, 王璐, 等. 基于白光干涉、扫描电镜及色差仪的不同留皮度粳米外观特征研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 88-93. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.012.
- [23] ROBERTS R L. Composition and taste evaluation of rice milled to different degrees[J]. Journal of Food Science, 2010, 44(1): 127-129. DOI:10.1111/j.1365-2621.1979.tb10023.x.
- [24] 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. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.9.0161.
- [25] 佐佐木泰弘, 河野元信. 日本稻米烘干·储藏·加工·流通·消费中的品质管理及信息追溯[J]. 北方水稻, 2012, 42(4): 1-6. DOI:10.16170/j.cnki.1673-6737.2012.04.009.
- [26] 刘厚清, 景梦瑶, 周涛. 白米的加工精度对食味及经济性的影响[J]. 粮食加工, 2018, 43(5): 36-41.
- [27] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201618010.
- [28] 安红周, 郭念国, 陈会会, 等. 一种基于白度的大米碾白程度快速判别方法: CN111104730A[P]. 2020-05-05[2022-06-09].
- [29] ZHANG Q, YANG W, SUN Z. Mechanical properties of sound and fissured rice kernels and their implications for rice breakage[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(1): 65-72.
- [30] 周显青, 孙晶, 张玉荣. 稻米籽粒静态力学特性的表征与分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 1-7. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2018.04.001.