华南地区14种籼型糙米食味品质分析及综合评价

何玉莹[1,2]，周鹏飞[2]，李亚[2]，刘光[2]，曾嘉锐[2]，李萍[2]，赵志浩[2]，张雁[2]，张名位[2]，邓媛元[2*]

（1.仲恺农业工程学院轻工食品学院，广东广州 510642）（2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所，农业农村部功能食品重点实验室，广东省农产品加工重点实验室，广东广州 510610）

摘要：为了研究华南地区不同品种籼稻糙米蒸煮食味品质的差异，该研究分析了14种华南地区主栽籼稻糙米的外观品质、营养成分含量、蒸煮特性、糊化特性、热力学特性以及质构特征，并进行相关性分析。在此基础上采用熵值法和聚类分析进行综合评价和分类。结果表明，皮层厚度显著影响糙米吸水率（相关系数为−0.605）、总淀粉含量显著影响糙米的吸水率（相关系数为0.418）、直链淀粉含量显著影响糙米膨胀率（相关系数为−0.434），蛋白质含量显著影响糙米崩解值（相关系数为−0.573），脂肪含量与米汤干物质（相关系数为0.600），可溶与不可溶性膳食纤维显著影响糙米的糊化焓（相关系数分别为0.501和0.425）。通过熵值分析得到综合评分最高的品种美香占2号和19香，综合评分分别为0.105和0.105，并且筛选出能够表征糙米食味品质的16个核心指标。聚类分析将14个品种分为了3类，各类分别包括2、9和3个品种。综上所述，该研究评价了华南地区14种籼糙米的差异，筛选出适合作为主食消费的两个品种。该研究为筛选适宜作为主食消费的籼糙米提供了理论依据。

关键词：籼稻；糙米；食味品质；蒸煮特性；质构特征

文章编号：1673-9078(2025)12-301-312 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1393

Quality Analysis and Comprehensive Evaluation of 14 Indica Brown Rice Cultivars in South China

HE Yuying[1,2], ZHOU Pengfei[2], LI Ya[2], LIU Guang[2], ZENG Jiarui[2], LI Ping[2], ZHAO Zhihao[2], ZHANG Yan[2], ZHANG Mingwei[2], DENG Yuanyuan[2*]

(1.Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510642, China)(2.Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The variations in taste and quality of different varieties of indica brown rice in South China remain poorly understood. To address this knowledge gap, the appearance, physicochemical, cooking, pasting, thermodynamic, and texture properties of 14 indica rice varieties in South China were analyzed. The entropy method and cluster analysis were used for comprehensive evaluation and classification. The results showed that for brown rice, skin thickness had a substantial impact on water absorption (correlation coefficient −0.605), amylose content had a substantial impact on the expansion rate (correlation coefficient

引文格式：

何玉莹,周鹏飞,李亚,等.华南地区14种籼型糙米食味品质分析及综合评价[J].现代食品科技,2025,41(12):301-312.

HE Yuying, ZHOU Pengfei, LI Ya, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of 14 indica brown rice cultivars in south China [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 301-312.

收稿日期：2024-09-18；修回日期：2024-11-25；接受日期：2024-12-10

基金项目：广东省重点研发计划项目（2023B0202060002）；科技创新战略（农业科研主力军建设）专项（R2023PY-JG014）；广东特支计划项目（2019BT02N112）；广东省农业科学院食品营养与健康研究中心建设运行经费（XT XM202205）

作者简介：何玉莹（1999-），女，在读研究生，研究方向：粮油加工，E-mail：1471104697@qq.com

通讯作者：邓媛元（1982-），女，博士，研究员，研究方向：粮油加工与营养健康食品，E-mail：yuanyuan_deng@yeah.net

−0.434), and protein content had a substantial impact on the disintegration value (correlation coefficient −0.573), fat content, and rice soup dry matter (correlation coefficient 0.600). Soluble and insoluble dietary fiber substantially affected the enthalpy of gelatinization of brown rice (correlation coefficients were 0.501 and 0.425, respectively). Entropy analysis revealed that the varieties Meixiangzhan 2 and 19xiang exhibited the highest comprehensive scores of 0.105 and 0.105, respectively. Moreover, 16 core indices were identified that could represent the taste quality of brown rice. Fourteen varieties were divided into three categories by cluster analysis, consisting of 2, 9, and 3 varieties, respectively. In summary, this study elucidates the differences among 14 indica brown rice varieties in South China, identifies two varieties suitable for consumption as staple foods, and provides a theoretical basis for indica brown rice screening.

Key words: indica rice; brown rice; taste quality; cooking property; texture property

全球疾病负担研究（The Global Burden of Disease Study, GBD）表明，膳食是影响中国人健康的第一要素，而全谷物摄入过低是导致饮食相关疾病的主要风险因素[1]。流行病学研究表明增加主食中全谷物摄入比例能显著降低罹患糖尿病、癌症、动脉粥样硬化、代谢综合征等慢性疾病的风险[2-4]。《中国居民膳食指南（2022）》推荐每天摄入全谷物杂豆类 50~150 g。但我国超过 80% 的成年居民全谷物摄入严重不足，成年男性每日全谷物摄入量仅 13.9 g，女性为 14.6 g，远低于推荐摄入量[5]。我国 60% 以上居民以大米为主食[6]，推广糙米主食化是破解全谷物消费不足的重要途径。但长期以来，糙米主食化消费接受度较低，主要原因一方面在于其皮层坚硬，阻碍了外部水分进入籽粒，难以糊化，蒸煮时间长；另一方面在于糙米皮层含有丰富的纤维、蛋白质、脂肪、多酚等营养活性物质，影响了其口感与风味，蒸煮后食味值较低。

糙米致密的皮层纤维结构阻碍了淀粉吸水糊化，导致糙米不易煮熟、口感粗糙，是限制糙米消费的关键因素。大多数糙米最佳蒸煮时间超过 30 min[7]，食味值较低[8]。籼稻是华南地区主要栽种的水稻品种。团队前期研究发现，相较于粳稻，籼稻普遍皮层较薄，蒸煮时间更短，更加适合作为糙米主食消费[9]。并且由于籼稻粒型细长，在传统精碾工艺中破损率高，整精米率约 50%~60%，资源浪费严重。而以全谷物糙米消费，可以极大的提高籼稻资源利用率。但由于籼稻品种众多，品种间品质差异较大，不同品种糙米作为全谷物消费的适应性并不明确。因此本研究收集了 14 个华南地区主栽籼稻品种，从外观品质、营养成分、蒸煮特性、质构特征、糊化特性、热力学性质等方面比较分析了其食味品质，并采用熵值法进行综合品质评价，旨在筛选获得适宜作为米饭主食消费的优质糙米品种。

1 材料与方法

1.1 糙米样品采集和制备

14 个籼稻品种由广东省农业科学院水稻研究所提供，包括：美香占 2 号、黄华占、双黄占、五广丝苗、吉丰优 1002、广 8 优、五优 308、合丰占、合美占、桂农占、金农、19 香、粤禾丝苗、粤农丝苗。试验前，使用砻谷机去除稻壳，并采用粉碎机研磨至 100 目筛。糙米粉 4 ℃下储存备用。

1.2 主要仪器与设备

THU35C 型试验用砻谷机，SATAKE 佐竹机械有限公司；JMCT12 大米外观品质分析仪，SATAKE 佐竹机械有限公司；DHG-9425A 电热恒温鼓风干燥箱，上海一恒科学仪器有限公司；TA-XT.PLUS 物性分析仪，英国 Stable Micro Systems 公司；Starch Master2 型 RVA 快速粘度仪，瑞典 Perten 波通瑞华科学仪器有限公司；SOX416- 脂肪测定仪，美国海能集团有限公司；DSC200F3 差示扫描量热仪，德国 NETZSCH 集团；UV-1800 紫外可见分光光度计，日本岛津分析仪器有限公司；S-3400N-II扫描电子显微镜，日立（中国）有限公司；800A 粉碎机，东莞市华太电器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 外观品质测定

采用大米外观检测系统测定糙米的外观品质，包括长度、宽度、长宽比、黄度和白度。糙米粒沿中心轴切片，并在真空环境下在横截面上镀金。通过扫描电镜观察糙米麸皮层的厚度和表观形态。

1.3.2 糙米理化指标的测定

总淀粉含量参照 GB 5009.9-2016；水分含量测定

参照 GB 5009. 3-2016；蛋白质含量测定参照 GB 5009. 5-2016；直链淀粉含量测定参照 GB/T 15683-2008；粗脂肪含量测定参照 GB/T 5512-2008；灰分含量测定参照 GB/T 5009.4-2010；胶稠度的测定参照 GB/T 22294-2008；膳食纤维测定参照 GB/T 37492-2019。

1.3.3 蒸煮特性测定

参考并适当修改 Chen 等[10]的方法测定糙米的最佳蒸煮时间、吸水率和膨胀率。

最佳蒸煮时间采用玻璃板－白芯法，简而言之，添加 250 mL 蒸馏水于 400 mL 烧杯中，将烧杯置于电炉上加热至沸腾，往烧杯中倒入 7 g 糙米样品并开始计时，从 20 min 起每隔 1 min 捞出至少 10 粒糙米，用两块玻璃片（75 mm×25 mm）进行挤压，查看米粒中心是否有白芯，有白芯即未煮熟，记录所有米粒均煮熟（即米粒中心完全没有白芯）时间为最适蒸煮时间。

吸水率和膨胀率的测定：将 7 g（记为 m_1）米和 25 mL 蒸馏水移入 100 mL 量筒中，记录体积为 V_1。将糙米转移至烧杯中用 120 mL 蒸馏水煮 20 min。将蒸煮后的糙米和米汤分离，记录冷却后糙米质量为 m_2。待米汤冷却后，根据王肇慈[11]描述的方法测定上述米汤中的碘蓝值、干物质含量和 pH 值。最后，将煮熟后糙米转移至 100 mL 量筒中并加入 50 mL 蒸馏水，记录体积为 V_2。吸水率和膨胀率的计算公式如下：

$$A=\frac{m_1}{m_2}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

A——加热吸水率，%；

m_1——米饭质量，g；

m_2——生米质量，g。

$$E=\frac{V_2-50-(V_1-25)}{V_1-25}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

E——膨胀率，%；

V_1——生米与 25 mL 蒸馏水的总体积，mL；

V_2——熟米与 50 mL 蒸馏水的总体积，mL。

1.3.4 糊化特性测定

参考 Zhang 等[12]的测定方法，采用 RVA（Perten, Starch Master2）测定糙米粉的糊化特性。测试前测定所有样品的水分含量并按 12% 水分含量进行校正。将糙米粉与 25 mL 去离子水在 RVA 铝盒中混匀，并开始测试程序，得到样品的峰值粘度（PV）、谷值粘度（TV）、最终粘度（FV）、崩解值（BD）、回生值（SB）、峰值时间（PeT）和糊化温度（PT）等糊化性能参数。

1.3.5 热特性测定

参考 Xu 等[13]的测定方法，采用 DSC（DSC200F3, NETZSCH, Germany）测定糙米粉的热力学特性。准确称取 4 mg 的糙米粉样品并使用移液枪移取 10 μL 蒸馏水于坩埚中，加盖压片后密封保存。将坩埚置于室温静止过夜以平衡水分。将平衡好的样品置于 DSC 仪器中，空白对照为同一批次的空坩埚，初始温度为 25 ℃，以 10 ℃ /min 的加热速率加热至 120 ℃终止。测试结束后通过仪器自带软件对热效应曲线进行分析处理，得到淀粉糊化时的焓值 ΔH，起始温度 To，峰值温度 Tp 和终止温度 Tc。

1.3.6 质构特性测定

参考 Peng 等[14]的测定方法，采用物性分析仪（TA-XT.PLUS, SMS, UK）测定糙米饭的质构特性。糙米以 1:1.4（*m/m*）的水米比蒸煮 30 min，打开铝盒盖子，将整个铝箱放置在分析仪平台上，同时采用以下测试条件进行 TPA 测试。测试前速度、测试速度、测试后速度、触发力、测量探头分别为 3.00、0.50、1.50 mm/s、5.0 g、P/36R。

1.3.7 感官评价测定

参照 GB/T 15682-2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》评价大米的感官品质。培训并挑选 30 名具有一定感官分析能力的人组成感官评价小组。将煮熟的糙米样品分成一式三份。每个小组成员根据大米的每项评价内容及其所占比重进行打分。煮熟的米饭样品的评价内容及比重如下：气味（20 分）、外观结构（20 分）、黏性（10 分）、弹性（10 分）、软硬度（10 分）、滋味（25 分）、冷饭质地（5 分）。

1.3.8 熵值法

采用熵值法计算不同品种糙米的综合得分。根据各种参数对糙米饭的影响，将吸水率、膨胀率、碘蓝值、pH 值、硬度、总淀粉、可溶性膳食纤维、不可溶膳食纤维、崩解值、糊化焓定性为正向参数；将背部厚度、腹部厚度、米汤干物质、胶稠度、最佳蒸煮时间、弹性、黏性、内聚性、回复性、咀嚼性、水分含量、直链淀粉含量、蛋白质含量、脂肪含量、峰值粘度、谷值粘度、最终粘度、回生值、峰值时间、糊化温度、起始温度、峰值温度、终止温度定性为逆向参数。通过熵值法计算 14 个糙米品种的综合得分[15]。

1.3.9 数据处理和统计分析

每个实验重复至少 3 次，图表由 SPSS 24.0、Origin Pro 2017、Excel 绘制，数据用 SPSS 24.0 软件进行相关性分析（Pearson 相关系数法）和聚类分析，

采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较，结果以 ±s 表示。

2 结果与讨论

2.1 外观品质

14 个糙米品种外观及数据结果如图 1、表 1 以及附件 1 所示。整体而言，米粒色泽偏黄、表面粗糙、粒型细长，具有典型的籼稻外形特征。与粳糙米相比，14 种籼糙米的长度偏长，宽度偏短[16]。除五优 308 以外，其他品种的长宽比均大于 3.0，其中 19 香米粒最为细长，长宽比达 4.27。美香占 2 号白度值最大，吉丰优 1002 黄度值最高。所有糙米皮层厚度状况，均呈现背部皮层厚度大于腹部。其中 19 香的背部厚度最薄，为 24.6 μm；美香占 2 号腹部最薄，为 19.95 μm，两者的腹背部厚度均值最低。糙米皮层营养物质丰富，蛋白质、脂肪以及矿物质等非淀粉组分从籽粒表面到籽粒中心逐渐减少[17]。皮层的厚度和皮层中丰富的蛋白质、脂肪等物质影响糙米水分吸收，进而影响其蒸煮时间。

图 1 不同品种糙米的米粒外观图

Fig.1 Appearance image of different varieties of brown rice grain

注：MXZ- 美香占 2 号；HHZ- 黄华占；SHZ- 双黄占；WGSM- 五广丝苗；JFY- 吉丰优 1002；G8Y- 广 8 优；WY308- 五优 308；HFZ- 合丰占；HMZ- 合美占；GNZ- 桂农占；JNSM- 金农丝苗；19X-19 香；YHSM- 粤禾丝苗；YNSM- 粤农丝苗；下同。

表 1 不同品种糙米的外观品质

Table 1 Appearance quality of different varieties of brown rice

品种	长度/mm	宽度/mm	长宽比	黄度	白度	背部皮层厚度/μm	腹部皮层厚度/μm	皮层厚度平均值 /μm
美香占 2 号	6.55 ± 0.05^{b}	2.05 ± 0.05^{c}	3.30 ± 0.00^{e}	39.10 ± 0.50^{a}	21.50 ± 0.30^{g}	28.00 ± 3.24^{c}	19.95 ± 2.21^{a}	23.98 ± 2.72^{a}
黄华占	7.05 ± 0.05^{e}	2.05 ± 0.05^{c}	3.48 ± 0.08^{fg}	44.75 ± 0.45^{d}	17.75 ± 0.45^{cd}	31.66 ± 1.17^{ef}	27.34 ± 0.62^{h}	29.5 ± 0.53^{gh}
双黄占	6.75 ± 0.05^{c}	2.20 ± 0.00^{de}	3.05 ± 0.05^{b}	43.93 ± 0.15^{cd}	18.35 ± 0.05^{de}	30.27 ± 1.80^{d}	27.67 ± 1.70^{h}	28.97 ± 1.52^{fg}
五广丝苗	7.20 ± 0.00^{f}	2.25 ± 0.05^{ef}	3.24 ± 0.03^{de}	42.95 ± 1.05^{bc}	19.10 ± 0.60^{ef}	31.17 ± 1.46^{e}	25.66 ± 0.75^{g}	28.42 ± 1.04^{ef}
吉丰优 1002	7.10 ± 0.00^{e}	2.35 ± 0.05^{fg}	3.04 ± 0.04^{b}	48.15 ± 0.05^{g}	15.60 ± 0.00^{a}	27.45 ± 1.19^{bc}	24.55 ± 1.24^{ef}	26.00 ± 1.18^{c}
广 8 优	7.60 ± 0.00^{g}	2.10 ± 0.10^{cd}	3.65 ± 0.15^{h}	46.25 ± 0.75^{ef}	16.30 ± 0.50^{ab}	34.27 ± 1.70^{h}	22.29 ± 2.50^{c}	28.28 ± 2.10^{ef}
五优 308	6.45 ± 0.05^{a}	2.20 ± 0.00^{de}	2.93 ± 0.02^{a}	46.55 ± 0.05^{f}	16.30 ± 0.10^{ab}	37.02 ± 1.91^{i}	23.19 ± 2.76^{d}	30.11 ± 1.96^{h}
合丰占	6.80 ± 0.00^{cd}	1.90 ± 0.00^{ab}	3.54 ± 0.04^{g}	46.10 ± 0.30^{ef}	16.75 ± 0.15^{b}	27.77 ± 1.10^{c}	23.80 ± 0.57^{de}	25.79 ± 0.69^{bc}
合美占	6.45 ± 0.05^{a}	2.00 ± 0.00^{bc}	3.20 ± 0.00^{cd}	42.70 ± 0.30^{bc}	18.95 ± 0.15^{ef}	33.07 ± 2.43^{g}	21.63 ± 1.12^{bc}	27.35 ± 0.76^{d}
桂农占	6.60 ± 0.00^{b}	2.10 ± 0.00^{cd}	3.12 ± 0.02^{bc}	42.70 ± 0.50^{bc}	18.85 ± 0.15^{ef}	30.86 ± 0.53^{de}	21.24 ± 0.37^{b}	26.05 ± 0.44^{c}
金农丝苗	6.60 ± 0.00^{b}	1.90 ± 0.00^{ab}	3.44 ± 0.03^{f}	45.10 ± 0.40^{def}	17.65 ± 0.25^{cd}	32.39 ± 0.70^{fg}	23.18 ± 2.15^{d}	27.78 ± 0.72^{de}
19 香	8.00 ± 0.00^{h}	1.85 ± 0.05^{a}	4.27 ± 0.17^{i}	45.75 ± 0.45^{ef}	17.05 ± 0.25^{bc}	24.6 ± 0.54^{a}	22.17 ± 2.15^{c}	23.38 ± 1.20^{a}
粤禾丝苗	6.60 ± 0.00^{b}	2.10 ± 0.00^{cd}	3.17 ± 0.03^{cd}	43.23 ± 0.10^{bc}	19.10 ± 0.10^{ef}	26.8 ± 0.59^{b}	23.71 ± 0.48^{de}	25.25 ± 0.26^{b}
粤农丝苗	6.85 ± 0.05^{d}	2.05 ± 0.05^{c}	3.40 ± 0.00^{f}	42.10 ± 0.30^{b}	19.50 ± 0.20^{f}	27.97 ± 1.42^{c}	23.24 ± 2.48^{de}	25.6 ± 1.91^{bc}
R	6.45~8	1.85~2.35	2.93~4.27	39.1~48.15	15.6~21.5	24.6~37.02	19.95~27.67	23.38~30.11
Av±SD	6.9 ± 0.45	2.08 ± 0.14	3.35 ± 0.34	44.24 ± 2.32	18.05 ± 1.59	30.24 ± 3.35	23.54 ± 2.2	26.89 ± 2.05
CV/%	6.59	6.79	10.1	5.24	8.8	11.08	9.33	7.62

注：1. 数据测定重复三次，以平均值 ± 标准偏差表示；2. 同列右上角不同字母代表样品间存在显著性差异（$P < 0.05$）；3. *R* 为变化范围；*Av±SD* 为平均值 ± 标准差；*CV* 为变异系数。下同。

2.2 糙米的理化性质

14 个品种糙米的主要理化成分测定结果如表 2 所示。研究表明，蛋白质、脂肪等物质与淀粉形成复杂结构，影响着米粉的糊化特性和消化性[18,19]。除吉丰优 1002 和金农丝苗直链淀粉含量超过 20% 以外，其余品种糙米直链淀粉含量均介于 16%~18% 之间。与湖北省主栽的 7 糙米品种相比，本研究中 14 种华南地区主栽糙米品种的直链淀粉含量略高[20]，可能与品种、种植环境、栽培方式及成熟度及储藏时间都有关系。直链淀粉是决定淀粉在烹饪和加工过程中的适口性、消化性、籽粒透明度主要因素[21]。而大多数淀粉作物中，直链淀粉通常与适口性呈负相关。蛋白质、脂肪和膳食纤维也会影响糙米食味品质。14 种糙米的粗蛋白含量变异系数为 8.33，不同品种糙米蛋白质的含量差异并不大，而影响蛋白质价值的主要因素蛋白质的种类。马晨怡[22]研究表明蛋白组分对米饭综合食味值的负效应程度：球蛋白＞总蛋白＞谷蛋白＞醇溶蛋白。Han 等[23]研究指出糙米糠层中的蛋白利用率和生物效价优于胚乳蛋白，糙米中的蛋白质可消化氨基酸组成与人体需要更接近。Zheng 等[24]研究表明脂肪含量高的米饭有更好的外观和风味。粗脂肪主要存在于皮层，皮层较薄的 19 香（23.38 μm）和美香占 2 号（23.98 μm），其粗脂肪含量也较低。此外，由于糙米皮层中纤维素和半纤维素等物质，导致糙米口感粗糙，大大降低了糙米的食用品质。此外，糙米中不可溶性膳食纤维与可溶性膳食纤维之比超过 2.2，也导致了糙米口感粗糙。

2.3 蒸煮品质

吸水率和膨胀率反映蒸煮后米饭的质量及体积变化，是大米的主要蒸煮品质。最佳烹饪时间与吸水率有关[25]。吸水率和膨胀率越大，糙米最佳蒸煮时间越短。然而糙米的浸泡时间超过 30 min 会导致淀粉过度溶胀、从而出现米饭变软、食味下降等现象[26]。如表 3 所示，五优 308 的吸水率为 264.25%、膨胀率为 184.16%，显著低于其它品种；且其最佳蒸煮时间达 39.33 min，显著高于其他品种；推测可能是其皮层较厚、不溶性膳食纤维含量较高，限制了水分进入。美香占 2 号、19 香和合丰占总淀粉含量高且直链淀粉占比较低，淀粉晶体紧密度相对较低，因此呈现较高的吸水率和膨胀率和较低的最佳蒸煮时间。同时，19 香的米汤干物质含量（19.50 mg/g）和碘蓝值（0.141）较高且米汤 pH 接近中性，表现出较好的食味品质。胶稠度反应稻米淀粉的胶体特性，胶稠度越高，米饭越柔软且冷却后不易回生。14 种供试糙米的胶稠度均大于 9.30 cm。

表 2 不同品种糙米的主要成分含量（%）

Table 2 Physicochemical properties of different varieties of brown rice (%)

品种	水分含量	粗蛋白	粗脂肪	总淀粉	直链淀粉	可溶膳食纤维	不可溶膳食纤维
美香占 2 号	11.61 ± 0.002^{ab}	7.68 ± 0.08^{a}	3.01 ± 0.05^{cd}	76.22 ± 1.44^{e}	16.68 ± 0.08^{bc}	1.87 ± 0.02^{d}	5.49 ± 0.03^{hi}
黄华占	11.28 ± 0.003^{a}	8.71 ± 0.10^{de}	3.15 ± 0.05^{cde}	72.79 ± 1.22^{bcde}	18.30 ± 0.14^{e}	1.67 ± 0.01^{cd}	5.15 ± 0.07^{fg}
双黄占	11.82 ± 0.006^{bc}	8.49 ± 0.07^{cd}	2.97 ± 0.01^{bc}	71.52 ± 1.11^{bc}	17.33 ± 0.15^{d}	1.34 ± 0.01^{ab}	4.66 ± 0.16^{de}
五广丝苗	11.79 ± 0.002^{bc}	8.38 ± 0.08^{c}	3.31 ± 0.01^{efg}	69.91 ± 0.43^{ab}	18.45 ± 0.00^{e}	1.19 ± 0.06^{a}	3.89 ± 0.03^{a}
吉丰优 1002	14.18 ± 0.001^{f}	8.86 ± 0.16^{ef}	3.28 ± 0.09^{def}	71.64 ± 1.48^{bc}	20.43 ± 0.73^{f}	1.41 ± 0.08^{abc}	4.14 ± 0.09^{ab}
广 8 优	12.46 ± 0.000^{de}	8.62 ± 0.16^{d}	3.03 ± 0.07^{cde}	74.16 ± 0.69^{cde}	16.01 ± 0.21^{a}	1.62 ± 0.23^{bcd}	4.56 ± 0.11^{d}
五优 308	12.41 ± 0.001^{de}	9.47 ± 0.14^{g}	2.96 ± 0.01^{bc}	72.38 ± 2.09^{bcd}	18.16 ± 0.00^{e}	1.62 ± 0.02^{bcd}	5.28 ± 0.1^{gh}
合丰占	11.68 ± 0.001^{ab}	10.01 ± 0.13^{h}	3.69 ± 0.04^{h}	73.24 ± 1.94^{bcde}	15.97 ± 0.27^{a}	1.50 ± 0.08^{abc}	5.60 ± 0.07^{i}
合美占	12.25 ± 0.000^{cde}	10.06 ± 0.04^{h}	3.44 ± 0.15^{fgh}	67.34 ± 1.83^{a}	16.17 ± 0.08^{ab}	1.43 ± 0.19^{abc}	3.91 ± 0.13^{a}
桂农占	11.61 ± 0.000^{ab}	9.45 ± 0.05^{g}	3.50 ± 0.14^{fgh}	72.97 ± 0.68^{bcde}	18.19 ± 0.12^{e}	1.39 ± 0.00^{abc}	4.89 ± 0.00^{ef}
金农丝苗	11.56 ± 0.001^{ab}	7.90 ± 0.01^{b}	3.59 ± 0.20^{gh}	75.31 ± 1.32^{de}	20.95 ± 0.49^{f}	1.88 ± 0.04^{d}	4.25 ± 0.05^{bc}
19 香	12.64 ± 0.000^{e}	9.01 ± 0.06^{f}	2.91 ± 0.03^{bc}	73.66 ± 2.25^{cde}	16.86 ± 0.12^{cd}	1.65 ± 0.02^{cd}	5.37 ± 0.09^{ghi}
粤禾丝苗	12.30 ± 0.002^{cde}	8.05 ± 0.03^{b}	2.58 ± 0.01^{a}	74.07 ± 2.21^{cde}	18.04 ± 0.02^{e}	1.33 ± 0.03^{ab}	4.77 ± 0.18^{de}
粤农丝苗	12.06 ± 0.001^{bcd}	9.25 ± 0.08^{g}	2.69 ± 0.04^{ab}	76.05 ± 0.60^{e}	16.85 ± 0.00^{cd}	1.44 ± 0.09^{abc}	4.51 ± 0.08^{cd}
R	11.28~14.18	7.68~10.06	2.58~3.69	67.34~76.22	15.97~20.95	1.19~1.88	3.89~5.6
Av±*SD*	12.12 ± 0.72	8.85 ± 0.74	3.15 ± 0.33	72.95 ± 2.39	17.74 ± 1.53	1.52 ± 0.2	4.75 ± 0.57
CV/%	5.92	8.33	10.53	3.27	8.6	13.28	12.09

表 3 不同品种糙米的蒸煮特性

Table 3 Cooking properties of 14 varieties of brown rice

品种	吸水率/%	膨胀率/%	米汤干物质含量/(mg/g)	碘蓝值	米汤 pH	胶稠度/cm	最佳蒸煮时间/min
美香占 2 号	343.09 ± 2.66^{g}	257.13 ± 1.20^{e}	17.86 ± 0.74^{ef}	0.084 ± 0.00^{ab}	6.71 ± 0.01^{bc}	10.65 ± 0.49^{cd}	24.33 ± 1.53^{a}
黄华占	288.19 ± 3.41^{b}	193.37 ± 1.70^{a}	16.51 ± 0.35^{de}	0.136 ± 0.01^{d}	6.81 ± 0.01^{f}	10.75 ± 0.07^{cd}	27.67 ± 0.58^{bc}
双黄占	295.91 ± 2.04^{bcd}	213.06 ± 2.72^{b}	13.83 ± 0.74^{bc}	0.129 ± 0.01^{cd}	6.73 ± 0.01^{cd}	11.20 ± 0.28^{d}	27.25 ± 1.50^{bc}
五广丝苗	292.60 ± 3.48^{bc}	190.18 ± 8.21^{a}	16.86 ± 1.76^{de}	0.104 ± 0.01^{bcd}	6.75 ± 0.00^{de}	9.30 ± 0.28^{a}	32.33 ± 0.58^{e}
吉丰优 1002	303.37 ± 0.31^{cde}	216.67 ± 0.01^{bc}	19.11 ± 1.07^{fg}	0.109 ± 0.01^{bcd}	6.84 ± 0.03^{g}	11.15 ± 0.07^{d}	34.67 ± 0.58^{f}
广 8 优	308.08 ± 0.16^{de}	243.26 ± 1.56^{d}	18.80 ± 0.61^{fg}	0.127 ± 0.00^{cd}	6.67 ± 0.02^{a}	11.40 ± 0.42^{d}	33.33 ± 0.58^{ef}
五优 308	264.25 ± 1.48^{a}	184.16 ± 0.83^{a}	16.57 ± 0.95^{de}	0.101 ± 0.01^{bcd}	6.69 ± 0.02^{ab}	11.05 ± 0.35^{d}	39.33 ± 0.58^{g}
合丰占	326.85 ± 1.54^{f}	291.66 ± 8.33^{f}	19.54 ± 1.74^{fg}	0.138 ± 0.01^{d}	6.85 ± 0.01^{gh}	11.05 ± 0.35^{d}	24.00 ± 1.00^{a}
合美占	301.74 ± 5.17^{bcde}	228.97 ± 1.38^{c}	20.02 ± 1.27^{g}	0.121 ± 0.01^{bcd}	6.76 ± 0.00^{e}	9.85 ± 0.35^{ab}	30.33 ± 0.58^{d}
桂农占	329.65 ± 0.19^{f}	265.15 ± 1.51^{e}	20.62 ± 0.81^{g}	0.200 ± 0.07^{e}	6.94 ± 0.01^{i}	10.10 ± 0.28^{bc}	29.33 ± 0.58^{cd}
金农丝苗	300.86 ± 2.09^{bcde}	217.17 ± 0.50^{bc}	15.26 ± 0.97^{cd}	0.054 ± 0.00^{a}	6.70 ± 0.01^{bc}	11.30 ± 0.42^{d}	29.33 ± 1.15^{cd}
19 香	329.48 ± 1.31^{f}	267.50 ± 0.83^{e}	19.50 ± 0.10^{fg}	0.141 ± 0.02^{d}	6.87 ± 0.02^{h}	9.90 ± 0.14^{ab}	23.33 ± 0.58^{a}
粤禾丝苗	298.21 ± 10.69^{bcd}	191.88 ± 4.99^{a}	10.69 ± 0.51^{a}	0.093 ± 0.01^{bc}	6.72 ± 0.02^{c}	10.75 ± 0.35^{cd}	27.67 ± 0.58^{bc}
粤农丝苗	312.99 ± 6.53^{e}	190.86 ± 7.53^{a}	13.49 ± 0.45^{b}	0.116 ± 0.01^{bcd}	6.67 ± 0.02^{a}	10.15 ± 0.07^{bc}	27.33 ± 1.53^{b}
R	264.25~343.09	184.16~291.66	10.69~20.62	0.054~0.2	6.67~6.94	9.3~11.4	23.33~39.33
Av±*SD*	306.81 ± 20.42	225.07 ± 34.71	17.05 ± 2.9	0.12 ± 0.03	6.77 ± 0.08	10.61 ± 0.65	29.3 ± 4.45
CV/%	6.65	15.42	16.98	28.42	1.24	6.09	15.2

2.4 糊化特性

如表 4 所示，14 种糙米粉的糊化特性存在显著差异。峰值粘度与谷值粘度之差为崩解值，崩解值越大，米饭越软。不同品种糙米的崩解值变异系数为 31.53%，离散程度大，说明不同品种糙米饭的软硬程度差异较大。最终粘度与谷值粘度之差为回生值，回生值越大，米饭冷却后更加容易变硬，口感变差。不同品种糙米的回生值变异系数为 20.2%，说明糙米饭回生后的品质差异较大。与胡中娥等[27]开展的不同籼稻品种杂交一代相比，本研究中 14 种糙米的崩解值（521.33~1 699.67 cp）整体偏低，回生值（779.33~1 638 cp）整体偏高。与张芳等[28]研究的 12 种粳型糙米相比，14 种籼型糙米的回生值范围也相对较高。广 8 优、五优 308 的糊化温度最高、回生值高、崩解值低，表明其淀粉颗粒结构更加稳定，难糊化，最佳蒸煮时间较长，米饭偏硬，且易回生。Wani 等[29]研究表明，直链淀粉分子多为线性存在，分子之间和分子内可以形成较多的氢键能够形成更稳定的晶体结构，因此需要更高的温度才能打破这些结构使淀粉颗粒吸水膨胀。而美香占 2 号、19 香糊化温度低、回生值低、崩解值高，说明其淀粉更易糊化，最佳蒸煮时间较短，米饭更软，且不易回生。

表 4 不同品种糙米的糊化粘度特性

Table 4 Pasting properties of different varieties of brown rice

品种	峰值粘度/cp	谷值粘度/cp	崩解值/cp	最终粘度/cp	回生值/cp	峰值时间/cp	糊化温度/℃
美香占 2 号	2 998.67 ± 27.43^{de}	1 299.00 ± 19.00^{a}	1 699.67 ± 33.08^{h}	2 078.33 ± 23.80^{a}	779.33 ± 5.86^{a}	5.36 ± 0.14^{a}	74.75 ± 0.05^{e}
黄华占	2 428.33 ± 65.77^{a}	1 349.67 ± 43.50^{a}	1 078.67 ± 28.92^{ef}	2 422.33 ± 69.82^{b}	1 072.67 ± 26.76^{bc}	5.71 ± 0.04^{bc}	70.13 ± 0.40^{a}
双黄占	2 679.33 ± 118.04^{b}	1 586.00 ± 70.15^{bc}	1 093.33 ± 48.95^{f}	2 763.67 ± 98.02^{c}	1 177.67 ± 28.01^{de}	5.93 ± 0.00^{de}	71.53 ± 0.45^{c}
五广丝苗	2 743.00 ± 30.41^{b}	1 958.33 ± 57.73^{e}	784.67 ± 81.68^{c}	3 093.33 ± 14.43^{e}	1 135.00 ± 56.56^{cd}	6.27 ± 0.13^{f}	72.30 ± 0.05^{d}
吉丰优 1002	2 871.33 ± 38.07^{c}	2 191.00 ± 40.34^{g}	680.33 ± 32.65^{b}	3 700.33 ± 36.77^{h}	1 509.33 ± 4.62^{g}	5.80 ± 0.07^{cd}	78.65 ± 0.00^{i}
广 8 优	2 707.00 ± 2.83^{b}	1 792.50 ± 14.85^{d}	914.50 ± 12.02^{d}	3 247.00 ± 25.46^{f}	1 454.50 ± 10.61^{g}	5.57 ± 0.05^{b}	82.28 ± 0.60^{k}
五优 308	2 678.00 ± 26.06^{b}	2 069.67 ± 12.34^{f}	608.33 ± 15.18^{b}	3 707.67 ± 36.61^{h}	1 638.00 ± 27.00^{h}	5.84 ± 0.04^{cde}	82.75 ± 0.00^{l}
合丰占	2 656.67 ± 101.29^{b}	1 762.67 ± 91.74^{d}	894.00 ± 53.67^{d}	2 989.00 ± 132.03^{de}	1 226.33 ± 43.92^{ef}	6.00 ± 0.12^{e}	75.58 ± 0.04^{f}
合美占	2 522.00 ± 55.33^{a}	1 525.00 ± 1.00^{b}	997.00 ± 54.34^{e}	2 657.67 ± 7.50^{c}	1 132.67 ± 7.02^{bcd}	5.73 ± 0.07^{c}	79.50 ± 0.07^{j}
桂农占	2 726.67 ± 19.86^{b}	2 205.33 ± 32.75^{g}	521.33 ± 50.54^{a}	3 481.67 ± 89.75^{g}	1 276.33 ± 90.09^{f}	6.20 ± 0.12^{f}	78.18 ± 0.49^{h}
金农丝苗	2 679.00 ± 20.07^{b}	1 601.67 ± 13.32^{bc}	1 077.33 ± 33.02^{ef}	2 424.00 ± 14.80^{b}	822.33 ± 3.21^{a}	5.93 ± 0.07^{de}	76.30 ± 0.05^{g}
19 香	2 460.33 ± 70.55^{a}	1 345.00 ± 11.53^{a}	1 115.33 ± 61.81^{f}	2 381.00 ± 11.27^{b}	1 036.00 ± 4.58^{b}	5.73 ± 0.07^{c}	74.73 ± 0.03^{e}
粤禾丝苗	3 094.33 ± 44.06^{e}	1 637.67 ± 60.86^{c}	1 456.67 ± 30.86^{g}	2 729.67 ± 79.50^{c}	1 092.00 ± 20.22^{bc}	5.78 ± 0.04^{cd}	70.70 ± 0.00^{b}
粤农丝苗	2 907.00 ± 48.59^{cd}	1 743.67 ± 28.54^{d}	1 163.33 ± 46.01^{f}	2 904.33 ± 23.46^{d}	1 160.67 ± 14.22^{d}	5.87 ± 0.13^{cde}	71.50 ± 0.05^{c}
R	2 428.33~3094.33	1 299~2205.33	521.33~1699.67	2 078.33~3707.67	779.33~1638	5.36~6.27	70.13~82.75
Av±SD	2 725.12 ± 191.52	1 719.08 ± 300.75	1 006.04 ± 317.21	2 898.57 ± 504.02	1 179.49 ± 238.28	5.84 ± 0.23	75.63 ± 4.18
CV/%	7.03	17.49	31.53	17.39	20.2	3.99	5.53

2.5 热特性

淀粉的热特性受支链淀粉的分子结构、淀粉组成和颗粒结构等因素影响[29]。Peng 等[14]发现具有良好口感值的杂交籼稻表现出更高的糊化焓值，归因于支链淀粉短链（DP 6-10）比例较低，而中链（DP 13-24）比例较高。余世峰等[30]研究表明，糊化焓变与淀粉直链淀粉含量的多少有关，而本研究中金农丝苗的直链淀粉含量和糊化焓都显著高于其他品种。如表 5 所示，14 种糙米糊化的起始温度范围 63.9~71.33 ℃，峰值温度的范围 76.6~87.47 ℃，终止温度的范围 70.2~79.13 ℃，焓值的范围 6.67~8.27 J/g。糙米粉的糊化焓越大，糙米蒸煮糊化过程中所需要能量就更多。在 14 个糙米品种中，金农丝苗的焓变值为 8.27 J/g，显著大于其余品种糙米。而五广丝苗、桂农占、吉丰优 1002 的焓变值都较低，分别为 6.67、6.72、6.78J/g，糊化所需能量更少。

2.6 质构特性

14 个糙米品种的质构特性如表 6 所示。在米饭的质构测定中，硬度和粘度最为稳定，也是表现其质构特征的最重要指标[31]。桂农占、粤禾丝苗和粤农丝苗米质的硬度分别为 5 731.28、5 628.00、5 744.22 g，显著高于其他品种。广 8 优和美香占 2 号的粘性分别为 330.59、367.86 g，显著高于其他品种。广 8 优、五优 308 和 19 香米质弹性较好，桂农占、五优 308、19 香耐咀嚼性较好。

2.7 感官评价

如图 2 所示，美香占 2 号和 19 香的感官评价得分为 71，显著高于其他品种的糙米，其余品种得分均低于 70。糙米糠层的存在会使米饭硬度增加、黏附性降低、口感粗糙[32]。美香占 2 号和 19 香不管是背部还是腹背皮层都较薄，而五优 308 皮层最厚，推测是影响其感官评分的重要因素。此外，研究表明直链淀粉含量是大米食味品质的主要影响因素，并且感官评分与直链淀粉含量呈负相关[33]。感官评分较高的美香占 2 号和 19 香两种糙米的直链淀粉含量都较低，感官评分较低的吉丰优 1002 直链淀粉含量较高。

表 5 不同品种糙米的热力学特性

Table 5 Thermal properties of 14 varieties of brown rice

品种	糊化焓/(J/g)	起始温度	峰值温度	终止温度
美香占 2 号	7.37 ± 0.02^{d}	70.87 ± 0.23^{h}	82.87 ± 0.30^{d}	76.53 ± 0.11^{c}
黄华占	7.26 ± 0.06^{cd}	64.57 ± 0.06^{b}	76.73 ± 0.15^{ab}	70.37 ± 0.06^{a}
双黄占	7.74 ± 0.11^{e}	64.87 ± 0.15^{b}	77.13 ± 0.15^{b}	70.53 ± 0.38^{a}
五广丝苗	6.67 ± 0.06^{a}	64.65 ± 0.21^{b}	76.60 ± 0.14^{a}	70.25 ± 0.35^{a}
吉丰优 1002	6.78 ± 0.02^{abc}	68.33 ± 0.23^{f}	83.67 ± 0.40^{e}	76.93 ± 0.21^{c}
广 8 优	7.02 ± 0.06^{bcd}	71.33 ± 0.40^{h}	85.80 ± 0.17^{f}	79.13 ± 0.15^{d}
五优 308	7.55 ± 0.49^{e}	66.00 ± 0.95^{c}	87.47 ± 0.25^{g}	79.13 ± 0.55^{d}
合丰占	7.76 ± 0.05^{e}	66.95 ± 0.21^{de}	79.00 ± 0.00^{c}	72.70 ± 0.14^{b}
合美占	7.13 ± 0.14^{bcd}	66.90 ± 0.10^{de}	78.77 ± 0.15^{c}	72.77 ± 0.06^{b}
桂农占	6.72 ± 0.08^{ab}	63.90 ± 0.28^{a}	77.05 ± 0.35^{ab}	70.20 ± 0.00^{a}
金农丝苗	8.27 ± 0.07^{f}	70.13 ± 0.45^{g}	82.97 ± 0.15^{d}	76.50 ± 0.30^{c}
19 香	7.95 ± 0.14^{e}	66.40 ± 0.20^{cd}	78.83 ± 0.30^{c}	72.30 ± 0.10^{b}
粤禾丝苗	7.05 ± 0.06^{bcd}	67.20 ± 0.30^{e}	79.07 ± 0.40^{c}	72.77 ± 0.29^{b}
粤农丝苗	7.03 ± 0.09^{bcd}	65.20 ± 0.10^{b}	76.90 ± 0.10^{ab}	70.63 ± 0.11^{a}
R	6.67~8.27	63.9~71.33	76.6~87.47	70.2~79.13
Av±*SD*	7.31 ± 0.49	66.95 ± 2.41	80.2 ± 3.65	73.62 ± 3.33
CV/%	6.66	3.6	4.55	4.53

表 6 不同品种糙米的质构特性

Table 6 Textural properties of 14 varieties of brown rice

品种	硬度/g	弹性/%	粘性/g	内聚性	回复性	咀嚼性/g
美香占 2 号	4 724.43 ± 71.74^{cd}	67.21 ± 5.00^{bcd}	−330.59 ± 73.76^{ab}	12.09 ± 0.52^{a}	4.13 ± 0.06^{a}	382.80 ± 17.76^{abc}
黄华占	5 102.34 ± 128.00^{ef}	65.90 ± 17.58^{bcd}	−105.27 ± 41.29^{efg}	13.46 ± 0.52^{ab}	4.73 ± 0.36^{ab}	453.75 ± 126.68^{bcd}
双黄占	4 869.29 ± 113.35^{de}	48.91 ± 2.11^{ab}	−271.03 ± 19.58^{bc}	14.58 ± 1.12^{abc}	5.19 ± 0.51^{abc}	347.37 ± 33.63^{ab}
五广丝苗	4 750.56 ± 89.85^{cd}	56.77 ± 14.45^{abc}	−167.08 ± 51.18^{def}	16.23 ± 0.97^{bcd}	6.39 ± 0.41^{bcde}	441.59 ± 125.27^{bc}
吉丰优 1002	4 373.07 ± 142.34^{b}	60.63 ± 2.60^{abcd}	−101.57 ± 24.08^{efg}	19.50 ± 1.48^{e}	7.72 ± 0.59^{e}	516.26 ± 38.58^{cde}
广 8 优	3 704.19 ± 185.20^{a}	76.78 ± 4.35^{cd}	−367.86 ± 30.09^{a}	15.98 ± 1.43^{bcd}	4.19 ± 0.50^{a}	452.85 ± 35.67^{bcd}
五优 308	4 222.10 ± 2.37^{b}	80.59 ± 2.16^{d}	−110.32 ± 39.78^{efg}	17.93 ± 0.22^{de}	7.10 ± 0.10^{de}	610.05 ± 8.38^{de}
合丰占	3 726.58 ± 1.71^{a}	48.54 ± 7.51^{ab}	−157.13 ± 17.52^{def}	18.41 ± 0.57^{de}	6.27 ± 0.15^{bcde}	334.63 ± 61.85^{ab}
合美占	4 934.75 ± 134.13^{def}	50.49 ± 11.06^{ab}	−92.65 ± 11.83^{fg}	15.34 ± 1.69^{bcd}	5.75 ± 1.56^{abcd}	372.01 ± 31.52^{abc}
桂农占	5 731.28 ± 29.63^{g}	69.76 ± 9.39^{bcd}	−35.48 ± 3.94^{g}	16.67 ± 1.95^{cde}	6.64 ± 0.73^{cde}	656.19 ± 8.13^{e}
金农丝苗	4 462.40 ± 102.97^{bc}	39.15 ± 0.83^{a}	−179.24 ± 5.32^{cdef}	13.93 ± 0.29^{abc}	5.11 ± 0.18^{abc}	243.32 ± 4.78^{a}
19 香	5 246.19 ± 130.41^{f}	78.70 ± 3.49^{cd}	−145.36 ± 18.85^{ef}	14.71 ± 0.87^{abc}	5.73 ± 0.45^{abcd}	605.96 ± 9.53^{de}
粤禾丝苗	5 628.00 ± 187.43^{g}	47.72 ± 1.06^{ab}	−248.46 ± 19.12^{bcd}	14.49 ± 0.02^{abc}	5.43 ± 0.09^{abcd}	389.13 ± 3.63^{abc}
粤农丝苗	5 744.22 ± 88.90^{g}	63.71 ± 3.09^{bcd}	−203.26 ± 31.27^{cde}	14.39 ± 0.82^{abc}	5.56 ± 0.58^{abcd}	525.47 ± 12.90^{cde}
R	3 704.19~5 744.22	39.15~80.59	−367.86~-35.48	12.09~19.5	4.13~7.72	243.32~656.19
Av±*SD*	4 801.39 ± 665.02	61.06 ± 12.94	−179.66 ± 95.47	15.55 ± 2.05	5.71 ± 1.04	452.24 ± 118.78
CV/%	13.85	21.19	−53.14	13.16	18.25	26.27

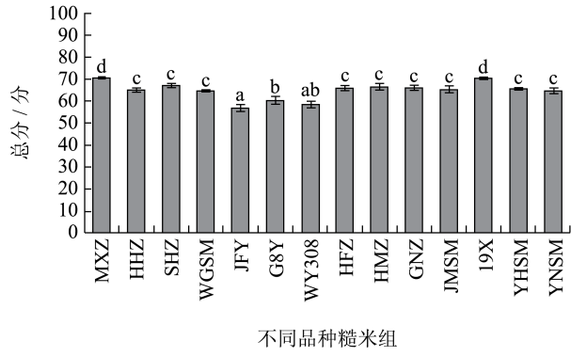

图 2 不同品种的糙米饭的感官评价得分

Fig.2 Sensory evaluation of different varieties of brown rices

注：图中不同字母表示样品存在显著性差异（$P<0.05$）。

2.8 相关性分析

糙米皮层含有的脂肪、蛋白质、纤维等多种营养成分共同影响了糙米的蒸煮特性。除最佳蒸煮时间和胶稠度外，供试糙米的皮层厚度与蒸煮特性各项参数均呈负相关。背部皮层厚度与吸水率（相关系数 −0.605）、米汤 pH（相关系数 −0.361）呈显著负相关，与最佳蒸煮时间（相关系数 0.655）、糊化温度（相关系数 0.473）呈极显著正相关，即糙米背部皮层越厚则糙米更难蒸煮。五优 308 背部皮层最厚的，最佳蒸煮时间也最长，米汤干物质含量也较低，表明背部较厚，不仅使水分更难进入糙米内部，还阻隔了糙米内部物质的溶出。腹部皮层厚度与吸水率（相关系数 −0.471）、膨胀率（相关系数 −0.497）、米汤干物质（相关系数 −0.349）呈显著负相关。李毅念等[34]研究表明，稻米的腹部淀粉颗粒大且淀粉的结构强度小于背部，糙米裂纹首先起始于腹部。虽然糙米皮层的存在使得糙米饭的营养价值更高，但是感官评价得分与腹、背皮层厚度均呈现负相关。

除淀粉外，其余主要成分与糙米饭硬度均呈现负相关，特别是与脂肪含量呈现显著的负相关。Li 等[35]发现，直链淀粉含量与糙米饭黏性呈显著负相关，粗蛋白与糙米饭黏性也表现出显著正相关，而我们的研究也得出相似的结果。此外，蛋白质与米饭质构的粘性、内聚性、回复性和咀嚼性四个质构参数呈显著正相关，相关系数分别 0.559、0.505、0.449、0.348。

蛋白质会抑制淀粉溶胀，使淀粉更难糊化[36]。从表 6 可以看出，蛋白质含量与糊化特性参数相关性较高，尤其与峰值粘度极显著负相关。Patindol 等[37]发现，由于蛋白质的存在，整精米粉显示出比碱法去除蛋白的精米粉具有更低的峰值粘度，而我们的分析也印证了这个观点。除崩解值和糊化温度外，膳食纤维含量与淀粉糊化参数呈负相关。可溶性膳食纤维显著影响淀粉的热力学特性。可溶性膳食纤维和不可溶性膳食纤维均与糊化焓呈显著正相关，相关系数分别为 0.501、0.425，即膳食纤维含量越高，糊化所需要的能量越多。

2.9 综合评价

评价糙米品质的参数众多，通常需要采用主成分分析[38]、熵值分析[39]等方法筛选出不同用途稻米品质的特征性指标。Huang[40]采用熵值法评价吉林省 12 种粳稻的 8 个指标，其中 4 个指标可能是粳稻品质差异的关键指标。考虑各种参数对糙米饭的影响，本研究亦采用熵值法计算各项特性参数的熵比重和权重，得出糙米的综合评价分值，筛选适宜作为蒸煮米饭食用的糙米品种。将本文中测试分析所得 25 个指标采用熵值分析，综合得分结果图 3 所示。19 香和美香占 2 号两个品种的糙米综合得分分别为 0.097 和 0.091，相对较高。其次是黄华占和粤禾丝苗，分别为 0.083 和 0.082。如图 4 所示，对两种评价方式的得分进行聚类分析发现，当聚类距离为 5~10 时，两种方法的聚类结果具有良好的一致性。在此基础上，该研究筛选了表 10 中与糙米感官品质相关性较高的 16 个参数重新进行熵值分析。相关性分析如表 7 所示，将与感官评价正相关的指标，吸水率、膨胀率、崩解值、硬度定为正向指标；将与感官评价负相关的指标胶稠度、最佳蒸煮时间、内聚性、回复性、水分含量、直链淀粉含量、谷值粘度、最终粘度、回生值、糊化温度、峰值温度、终止温度定为逆向指标。分析结果图 4 所示。简化前后两次分析结果高度相似，提示上述 16 个参数是评价糙米主食化消费的核心指标。

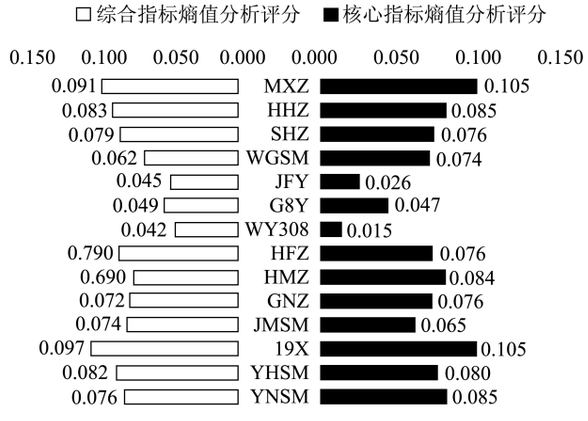

图 3 熵值分析结果对比图

Fig.3 Comparison of two entropy analyses

表 7 相关性分析

Table 7 Correlations

		背部厚度	腹部厚度	水分含量	直链淀粉含量	蛋白质含量	脂肪含量	总淀粉	可溶性膳食纤维	不可溶膳食纤维	感官评价
蒸煮特性	吸水率	−0.605**	−0.471*	−0.098	−0.369	−0.029	0.141	0.418*	0.222	0.313	0.552**
	膨胀率	−0.333	−0.497**	−0.068	−0.434*	0.266	0.443*	0.169	0.24	0.438*	0.387*
	米汤干物质	0.089	−0.349*	0.119	−0.171	0.477**	0.600**	−0.275	0.147	0.081	−0.069
	碘蓝值	−0.045	−0.075	−0.062	−0.267	0.486**	0.132	−0.179	−0.304	0.178	0.116
	pH	−0.361*	−0.137	0.094	0.116	0.386*	0.457*	−0.179	−0.195	0.198	0.069
	胶稠度	0.08	0.13	0.04	0.172	−0.195	−0.015	0.258	0.354	0.227	−0.417*
	最佳蒸煮时间	0.655**	0.16	0.409**	0.379*	0.134	0.029	−0.305*	−0.147	−0.419*	−0.849**
质构特性	硬度	−0.346*	0.058	−0.197	0.044	−0.022	−0.379*	0.054	−0.245	−0.084	0.431*
	弹性	0.023	−0.316	0.202	−0.254	0.106	−0.341	−0.041	0.183	0.344	−0.22
	黏性	−0.041	0.014	0.168	−0.400*	0.55 9**	0.409*	−0.457**	−0.213	−0.067	−0.141
	内聚性	0.061	−0.023	0.561**	0.201	0.505**	0.392*	−0.390*	−0.346	−0.095	−0.573**
	回复性	−0.119	0.002	0.510**	0.402*	0.449**	0.276	−0.424*	−0.428*	−0.135	−0.422*
	咀嚼性	−0.124	−0.245	0.346*	−0.033	0.348*	−0.233	−0.224	−0.109	0.195	−0.239
糊化特性	峰值粘度	−0.285	−0.175	0.115	0.143	-0.451**	−0.427*	0.358*	−0.163	−0.117	−0.136
	谷值粘度	0.239	−0.019	0.352*	0.403**	0.311	0.212	−0.182	−0.455*	−0.327	−0.735**
	崩解值	−0.403**	−0.091	−0.257	−0.293	−0.573**	−0.453*	0.395*	0.323	0.232	0.619**
	最终粘度	0.3	0.001	0.458**	0.302	0.413**	0.097	−0.241	−0.437*	−0.241	−0.828**
	回生值	0.334*	0.026	0.524**	0.125	0.489**	−0.066	−0.281	−0.34	−0.091	−0.821**
	峰值时间	0.114	0.289	−0.158	0.239	0.299	0.313	−0.28	−0.585**	−0.31	−0.116
	糊化温度	0.473**	−0.425*	0.321	−0.007	0.374*	0.204	−0.196	0.224	0.017	−0.591**
热特性	糊化焓	0.007	−0.005	−0.225	0.024	−0.079	0.093	0.214	0.501**	0.425*	0.243
	起始温度	0.054	−0.303	0.153	−0.055	−0.411*	0.045	0.336*	0.518**	−0.016	−0.119
	峰值温度	0.402*	−0.24	0.356*	0.16	−0.103	−0.037	0.145	0.458*	0.119	−0.559**
	终止温度	0.375*	−0.236	0.363*	0.134	−0.14	−0.011	0.173	0.487**	0.07	−0.529**
	感官评价	−0.342	−0.166	−0.629**	−0.461*	−0.186	−0.021	0.228	0.172	0.306	1

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

2.10 品种聚类分析

对感官评分、综合指标熵值分析评分、核心指标熵值分析评分三组数据分别进行聚类分析，结果如图 4 所示。以 14 种水稻的感官评分和综合指标熵值分析评分分别进行聚类分析，结果如图 2 所示。不管是图 4a 感官评分聚类分析还是图 4b 综合指标熵值分析评分聚类分析都可以将 14 种糙米分为三类，并且归类结果高度一致。第Ⅰ类包括：美香占 2 号、19 香；第Ⅱ类包括：黄华占、双黄占、五广丝苗、合丰占、合美占、桂农占、金农丝苗、粤禾丝苗、粤农丝苗；第Ⅲ类包括：吉丰优 1002、广 8 优、五优 308。验证了使用熵值法评价糙米品质的合理性。而采用核心指标熵值分析评分进行聚类分析，结果如图 4c 所示，当欧氏距离为 10 时，与感官评分归类一致，说明筛选出的核心指标可以较好的表征糙米品种特性。通过聚类分析发现，第Ⅰ类糙米美香占 2 号和 19 香的综合得分较高，米粒易于蒸煮，米饭食味品质高，是适宜作为糙米饭蒸煮食用的最佳品种。第Ⅲ类糙米皮层相对较厚，蒸煮难度较大，且米饭相对偏硬。第Ⅱ类糙米则介于上述两种类型之间。

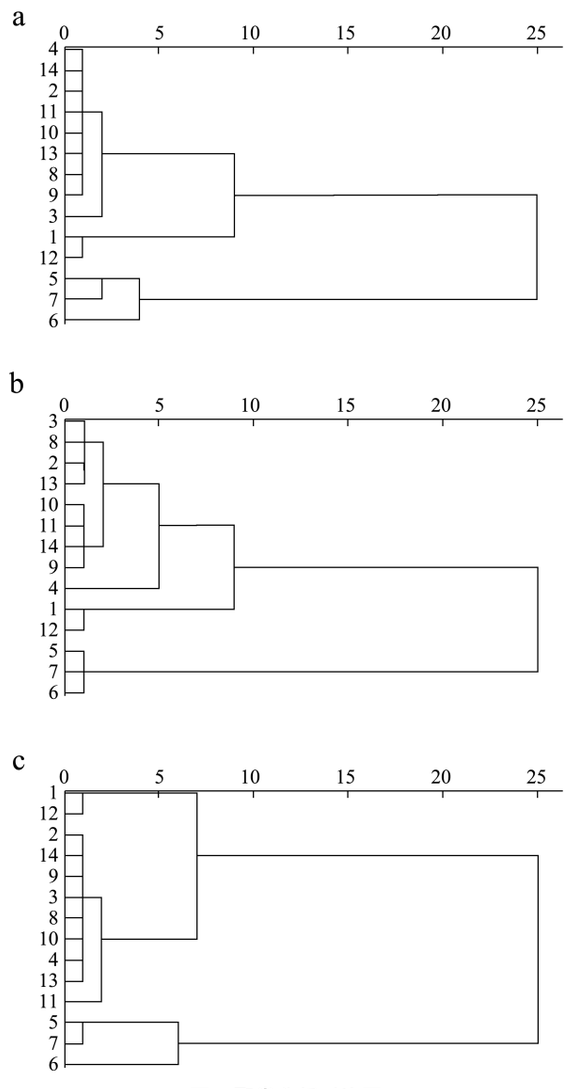

图 4 聚类分析对比图

Fig.4 Cluster dendrogram of scores from different analysis methods

注：（a）感官评分聚类分析；（b）综合指标熵值分析聚类分析；（c）核心指标熵值分析聚类分析。1~14 依次代表美香占 2 号，黄华占，双黄占，五广丝苗，吉丰优 1002，广 8 优，五优 308，合丰占，合美占，桂农占，金农丝苗，19 香，粤禾丝苗，粤农丝苗。

3 结论

本研究评价了 14 个华南地区主栽籼稻品种作为糙米主食化消费的适宜性。采用熵值分析法筛选了能够表征糙米主食消费适宜性的核心指标 16 个，分别是正向指标：吸水率、膨胀率、崩解值、硬度；逆向指标：胶稠度、最佳蒸煮时间、内聚性、回复性、水分含量、直链淀粉含量、谷值粘度、最终粘度、回生值、糊化温度、峰值温度、终止温度。进一步采用聚类分析，将 14 个品种分为了 3 类，第Ⅰ类包括：美香占 2 号、19 香；第Ⅱ类包括：黄华占、双黄占、五广丝苗、合丰占、合美占、桂农占、金农丝苗、粤禾丝苗、粤农丝苗；第Ⅲ类包括：吉丰优 1002、广 8 优、五优 308。其中第Ⅰ类糙米，美香占 2 号和 19 香的综合得分较高，米粒易于蒸煮，米饭食味品质高，是适宜作为糙米饭蒸煮食用的最佳品种。

参考文献

[1] AFSHIN A, SUR P J, FAY K A, et al. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 [J]. The Lancet, 2019, 393(10184): 1958-1972.

[2] QI L, VAN DAM R M, LIU S, et al. Whole-grain, bran, and cereal fiber intakes and markers of systemic inflammation in diabetic women [J]. Diabetes Care, 2006, 29(2): 207-211.

[3] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses [J]. The Lancet, 2019, 393(10170): 434-445.

[4] YANG W, MA Y, LIU Y, et al. Association of intake of whole grains and dietary fiber with risk of hepatocellular carcinoma in US adults [J]. JAMA Oncology, 2019, 5(6): 879-886.

[5] 中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)[J].营养学报,2020,42(6):521.

[6] 李尹舒.基于用户画像的大米电商精准营销策略研究[D].长春:吉林大学,2022.

[7] 陈冰洁,乔勇进,曹黎明,等.8种上海地产糙米的食用品质比较分析[J].中国粮油学报,2020,35(10):23-28.

[8] 张欣,施利利,丁得亮,等.糙米与发芽糙米主要品质性状的比较研究[J].食品科技,2016,41(6):183-186.

[9] 李亚,李健雄,张名位,等.华南地区主栽籼型糙米食用品质比较分析[J].中国粮油学报,2023,38(8):58-66.

[10] CHEN H H, CHEN Y K, CHANG H C. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice [J]. Food Chemistry, 2012, 135(1): 74-79.

[11] 王肇慈.粮油食品品质分析[M].北京:中国轻工业出版社,2000.

[12] ZHANG X, WANG L, CHENG M, et al. Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 140-146.

[13] XU X, YAN W, YANG Z, et al. Effect of ultra-high pressure on quality characteristics of parboiled rice [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 117-123.

[14] PENG Y, MAO B, ZHANG C, et al. Influence of physicochemical properties and starch fine structure on the eating quality of hybrid rice with similar apparent amylose content [J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129461.

[15] ZOU Z H, YI Y, SUN J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1020-1023.

[16] TENG M, DUAN X, FENG R, et al. Effects of harvest time on grinding quality, appearance quality and physical and chemical quality

of japonica rice [J]. Foods, 2024, 13(18): 2868.
[17] LAMBERTS L, DE BIE E, VANDEPUTTE G E, et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice [J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1496-1503.
[18] WANG S, WANG J, YU J, et al. Effect of fatty acids on functional properties of normal wheat and waxy wheat starches: a structural basis [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 285-292.
[19] LU Z H, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 214-222.
[20] 隋勇,施建斌,蔡沙,等.不同品种糙米营养品质和理化特性比较[J].现代食品科技,2023,39(6):37-43.
[21] HUANG L, SREENIVASULU N, LIU Q. Waxy editing: old meets new [J]. Trends in Plant Science, 2020, 25(10): 963-966.
[22] 马晨怡.绿色、有机稻米与常规稻米的营养品质比较研究[D].北京:中国农业科学院,2022.
[23] 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.
[24] ZHENG X, LAN Y. Effects of drying temperature and moisture content on rice taste quality [C]// The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference: (In 2 Volumes). 2007: 1112-1117.
[25] ZHANG X, WANG L, CHENG M, et al. Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 140-146.
[26] 朱梦琴.电饭煲浸泡阶段参数优化设计改善陈籼米饭品质的研究[D].无锡:江南大学,2021.
[27] 胡中娥,李健,李吉,等.不同籼稻品种杂交一代RVA谱特征值与食味品质相关性研究[J].中国粮油学报,2022,37(8):44-48.
[28] 张芳,李玲玲,于丰凡,等.不同产地和品种发芽糙米的理化特性与食用品质研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(10):182-190.
[29] WANI A A, SINGH P, SHAH M A, et al. Physico-chemical, thermal and rheological properties of starches isolated from newly released rice cultivars grown in Indian temperate climates [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(1): 176-183.
[30] 余世锋,杨秀春,MENAGER L,等.直链淀粉、蛋白质及脂类对大米粉热特性的影响[J].食品与发酵工业,2009,35(4):38-42.
[31] 钟国才,陈威,陈嘉东,等.增城丝苗米米饭理化性质与质构特性的相关性分析[J].现代食品科技,2013,29(11):2607-2611.
[32] KOTHAKOTA A, PANDEY J P, AHMAD A H, et al. Optimization of process parameters for enhancing the Cooking characteristics of enzymatically pretreated Brown rice (psd-15) [J]. The Ecoscan, 2015, 9(2): 397-402.
[33] LI H, PRAKASH S, NICHOLSON T M, et al. The importance of amylose and amylopectin fine structure for textural properties of cooked rice grains [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 702-711.
[34] 李毅念,丁为民.稻谷腹部、背部微观结构差异性分析[J].中国农业科学,2010,43(16):3473-3480.
[35] LI H, PRAKASH S, NICHOLSON T M, et al. Instrumental measurement of cooked rice texture by dynamic rheological testing and its relation to the fine structure of rice starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 146: 253-263.
[36] LIM S T, LEE J H, SHIN D H, et al. Comparison of protein extraction solutions for rice starch isolation and effects of residual protein content on starch pasting properties [J]. Starch‐Stärke, 1999, 51(4): 120-125.
[37] PATINDOL J, WANG Y J, JANE J. Structure-functionality changes in starch following rough rice storage [J]. Starch-Stärke, 2005, 57(5): 197-207.
[38] 王荣升,牟凤臣,李坤,等.寒地粳稻碾磨品质和食味品质相关性状的综合分析[J].作物杂志,2023,2:115-120.
[39] 刘宝海,高世伟,聂守军,等.2009—2018年黑龙江省审定的常规粳稻品种综合评价[J].华中农业大学学报,2021,40(2):112-122.
[40] HUANG X. Entropy weight fuzzy comprehensive evaluation in screening of japonica rice quality [J]. Academic Journal of Agricultural Sciences, 2022, 3(4): 74-88.