许立益, 余宏达, 江冬怡, 等. 紫米与籼米复配比对复配粉性质及紫米粉丝品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 114−121. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120267
XU Liyi, YU Hongda, JIANG Dongyi, et al. Effects of the Mixing Ratio of Purple Rice and Indica Rice on the Properties of Mixed Powder and the Quality of Purple Rice Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 114−121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120267

· 研究与探讨 ·

紫米与籼米复配比对复配粉性质及紫米粉丝品质的影响

许立益[1], 余宏达[2], 江冬怡[1], 郑经绍[3], 林嘉尉[1], 黄　苇[1,*]
（1.华南农业大学食品学院, 广东 广州 510642;
2.新兴县农业推广总站, 广东 新兴 527400;
3.新兴县微丰农业科技有限公司, 广东 新兴 527400）

摘　要: 本文通过混配高直链淀粉的籼米粉来改善紫米粉性质，研究复配粉不同配比对原料性质及紫米粉丝品质的影响。将紫米粉与籼米粉按照一定比例进行复配并制作粉丝，以复配粉的直链淀粉含量、溶解度、膨润力、胶稠度、糊化及凝胶特性为理化性质测定指标，以紫米粉丝的蒸煮、花色苷含量及保留率与感官品质为评价指标，得到了优选原料粉复配比例为籼米粉∶紫米粉为 8∶2。在该配比下，复配粉的直链淀粉含量由紫米粉的 15.75 g/100 g 增加到 26.86 g/100 g，溶解度降低为 6.24 g/100 g，膨润力减少为 6.80 g/g，胶稠度由中软稠度变为硬稠度，低谷黏度、最终黏度与回生值增大，凝胶硬度与持水性增大，粘结性与失重率降低。上述原料性质的变化增强了紫米粉丝凝胶的结构强度，降低了其粘性，优化了其水合性质，最终改善紫米粉丝品质。最适配比下制作的紫米粉丝品质为：复水时间为 508 s，断条率为 9.67%，蒸煮损失率为 34.37%，蒸煮品质与市售米粉丝水平相近，花色苷含量为 18.36 mg/100 g，保留率达到 65.68%，颜色紫红，带有紫米清香，软硬适中。

关键词: 紫米粉丝, 综合品质, 复配粉, 理化特性
中图分类号: TS210.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2022)17−0114−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120267
本文网刊:

Effects of the Mixing Ratio of Purple Rice and Indica Rice on the Properties of Mixed Powder and the Quality of Purple Rice Noodles

XU Liyi[1], YU Hongda[2], JIANG Dongyi[1], ZHENG Jingshao[3], LIN Jiawei[1], HUANG Wei[1,*]
（1.College of Food, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2.Xinxing Agricultural Extension Station, Xinxing 527400, China;
3.Xinxing Weifeng Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Xinxing 527400, China）

Abstract: In this paper, the properties of purple rice powder were improved by mixing high amylose indica rice powder, and the effect of different proportions of mixed powder on the properties of raw materials and the quality of purple rice noodles was studied. The purple rice powder and the indica rice powder were mixed according to a certain proportion to make noodles. The physicochemical properties of mixed powder including amylose content, solubility, swelling power, gel consistency, gelatinization and gel properties were used as determination indexes. And the cooking, anthocyanin content and retention rate and sensory quality of purple rice noodles were used as evaluation indicators. The results showed that the optimum proportion of raw material powder was indica rice powder: purple rice powder=8∶2. Under this ratio, the amylose content of the mixed powder increased from 15.75 g/100 g of pure purple rice powder to 26.86 g/100 g, the solubility

收稿日期: 2021−12−27
基金项目: 2021 年广东省企业科技特派员专项“紫米排米粉加工工艺技术优化研究”;2020 年省级现代农业产业园项目“云浮市新兴县丝苗米产业园”（粤农农函 [2020]515 号）。
作者简介: 许立益（1996−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品新产品与保健食品, E-mail: 936915656@qq.com。
*** 通信作者:** 黄苇（1967−）, 女, 硕士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: weihscau@163.com。

decreased to 6.24 g/100 g, the swelling force decreased to 6.80 g/g, and the gel consistency decreased from the medium-soft consistency to hard consistency, the trough viscosity, final viscosity and retrogradation value increased, the gel hardness and water holding capacity increased, and the adhesiveness and weight loss rate decreased. The above-mentioned changes in the properties of the raw materials enhanced the structural strength of the purple rice noodles gel, reduced its stickiness, optimized its hydration properties, and finally improved the quality of the purple rice noodles. The quality of purple rice noodles made under the optimum ratio was as follows: The cooking time was 508 s, the broken strip rate was 9.67%, the cooking loss rate was 34.37%, the cooking quality was similar to the commercial rice noodles, the anthocyanin content was 18.36 mg/100 g, the retention rate reached 65.68%, and the color was purple, with the fragrance of purple rice, moderate hardness and softness.

Key words: purple rice noodles; comprehensive quality; compound powder; physical and chemical properties

“天紫 1 号”紫米外观呈紫黑色，米香浓郁，呈现特别的香芋香气[1]，是有色稻谷中较为珍稀的品种，与普通精白米相比，紫米除了富含代表性营养物质花色苷外，其他的黄酮类、酚类以及维生素矿物质等营养元素的含量也更为丰富[2]，拥有良好的深加工价值。但目前紫米的食用方式仍然以熬粥、煮饭等方式为主，深加工程度较低，产品单一。

米粉丝是以大米为主要原料，经过清洗、磨浆、熟化、挤压成型及干燥等工序得到的丝状或条状传统食品[3]，在我国南方深受欢迎，具有广阔的市场前景。而将紫米作为原料大米进行紫米粉丝的开发，不仅能丰富米粉丝产品品种，也能进一步提升紫米附加值。

本文通过前期研究发现，紫米占比偏高时，紫米粉丝制作过程中会出现挤丝困难、粉丝并条严重等情况，成品紫米粉丝也存在不耐蒸煮、糊汤严重等问题，经分析这与紫米中直链淀粉含量偏低、溶解度较大相关联。因此本文拟通过添加高直链淀粉籼米粉的方法来改善紫米粉加工性能及提升紫米粉丝产品品质。本文以双螺杆挤压技术制备紫米粉丝，通过研究紫米粉与籼米粉的不同配比对复配粉基础性质与淀粉特性的影响，并以蒸煮品质、花色苷含量及保留率、感官品质为评价基础，揭示复配粉不同配比影响米粉丝品质的内在机理，最终优选出紫米粉丝的最佳原料复配比例，以期为紫米粉丝的生产开发提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

紫米　广东省云浮市新兴县微丰农业科技有限公司提供的“天紫 1 号”；籼米粉　汉中科润速冻食品有限责任公司；直链淀粉标准品　美国 Sigma-Aldrich 公司；支链淀粉标准品　上海源叶生物科技有限公司；3-5 二硝基水杨酸、无水乙醇、盐酸、氢氧化钠　国药集团化学试剂有限公司；碘、碘化钾、乙酸铅、酒石酸钾钠、苯酚、亚硫酸钠　广州化学试剂；百里香酚蓝、乙酸、石油醚　江苏强盛功能化学；无水葡萄糖　上海伯奥生物科技；试剂纯度均为分析纯。

DS32-II A 型实验双螺杆挤压膨化机　济南赛信机械有限公司；StarchMaster II 型 RVA 快速粘度仪　Perten 公司；EZ-SX500N 质构仪　日本岛津公司；立式分级连续投料粉碎机　温州市顶历医疗器械有限公司；TGL-16M 高速台式冷冻离心机　湘仪离心机仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　复配粉的制备　紫米粉碎后，添加籼米粉，把紫米粉与籼米粉按不同比例（9∶1、8∶2、7∶3、6∶4、5∶5）充分混合均匀，过 120 目筛备用。

1.2.2　紫米粉丝的制备　复配粉→调质器内搅拌调节水分至 40%→静置均湿 30 min→设置双螺杆挤压机参数→挤压成型→4 ℃ 老化 2 h→风温 28 ℃ 鼓风干燥 6 h→成品

挤压机具体参数如下：长径比为 18.75∶1，进料速率为 20 Hz，螺杆转速为 24 Hz，挤压温度由进料段到出口段为三段控制，分别为 90、100、80 ℃，挤压孔径为 1.4 mm。

1.2.3　复配粉基础理化指标的测定　直链淀粉含量按照 GB/T 15683-2008 进行测定，原理为淀粉碱水解；溶解度与膨润力参考郭静璇[4] 的方法进行测定；胶稠度按照 GB/T 22294-2008 进行测定。

1.2.4　复配粉淀粉特性的测定

1.2.4.1　糊化特性的测定　参考方浩标等[5] 的方法进行测定，将 3.5 g 样品粉末与 25 g 蒸馏水混合后用快速黏度测定仪器进行进行测定，样品按 14% 水分校正，测定程序为标准程序 1。

1.2.4.2　凝胶特性的测定　淀粉老化后形成的凝胶，其主要性质包括质构及水合特性[6]。参考李琳等[7] 的方法，称取样品 7.5 g 置于 25 mL 烧杯中配制成质量分数为 30% 的米粉乳液，在 100 ℃ 下磁力搅拌加热 5 min 后，95 ℃ 恒温水浴 20 min，4 ℃ 老化 24 h，得到凝胶样品，将凝胶样品制成直径约 30 mm，高度 20 mm 的圆柱体，备用。

凝胶质构的测定[7]：采用 P/36R 探头对凝胶样品进行 TPA 质构测定。测定参数如下：测试速度为 5 mm/s；压缩比 50%；触发力 10 g。

凝胶持水性的测定：称量滤纸质量为 W_0，称量凝胶样品质量记为 W_1，滤纸包裹样品，在离心条件为−4 ℃，7000 r/min，15 min 条件下，进行冷冻离心，

称量此时滤纸质量为 W_2。计算公式为：

$$持水性H(\%)=\frac{W_2-W_0}{W_1}\times 100 \quad 式（1）$$

凝胶失重率的测定：称取凝胶样品质量记为 W_1，将样品真空密封包装后置于 90 ℃ 恒温水浴 20 min，待冷却至室温，取出，擦干样品凝胶表面水分后，称量重量记为 W_3。计算公式为：

$$失重率L(\%)=\frac{W_1-W_3}{W_1}\times 100 \quad 式（2）$$

1.2.5 紫米粉丝品质的测定

1.2.5.1 紫米粉丝蒸煮品质的测定 参考郭静璇[4]方法进行复水时间的测定：取 30 根长度约 20 cm 的米粉丝放入到 2 L 沸腾的蒸馏水中，保持水的沸腾状态，待米粉快煮熟时，每隔一段时间取样置于两块透明玻璃板中挤压，若米粉硬芯消失，说明已达到复水要求，记录复水时间。

断条率的测定[4]：取 30 根粗细相近长度约 20 cm 的米粉，按以上方法烹煮至最佳复水时间后，沥水并记录断条数(n)。

$$断条率(\%)=\frac{n}{30}\times 100 \quad 式（3）$$

蒸煮损失的测定[4]：在 105 ℃ 下烘干米粉丝得到平均水分含量，另称取 30 根长度约 20 cm 的米粉丝，计算得到其干重为 m_0，按照以上方法烹煮到最佳复水时间，用清水淋洗 20 s 后，转移到干净的烧杯，然后将米粉在 105 ℃ 下干燥至恒重，记录恒重重量(m_1)，用以下公式得到蒸煮损失率。

$$蒸煮损失率(\%)=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times 100 \quad 式（4）$$

1.2.5.2 紫米粉丝花色苷含量及保留率的测定 花色苷含量的测定，参考修茹燕[8]的方法进行。先称取 0.1 g 样品粉末，后加入 95% 乙醇与 1.5 mol/L HCl 的混合液(85:15 V/V)25 mL，在 60℃ 的水浴条件下浸提 5 h，每隔 10 min 充分摇匀一次，抽滤后重新定容至 25 mL，在 535 nm 紫外分光光度计下测定吸光度，花色苷含量及其保留率的计算公式如下：

$$花色苷含量(mg/100g)=\frac{OD\times R\times V}{98.2\times m}\times 100 \quad 式（5）$$

$$花色苷保留率(\%)=\frac{m_{花色苷}}{140\times P_{紫米粉}}\times 100 \quad 式（6）$$

式中：OD 为 535 nm 下的吸光度；R 为稀释倍数；V 为样品体积，mL；m 为样品质量，g；$m_{花色苷}$为公式(5)计算结果；$P_{紫米粉}$为不同复配比例中紫米的占比；140 为选用紫米的平均花色苷含量，mg/100 g。

1.2.5.3 紫米粉丝感官品质的测定 感官品质鉴定选用模糊评价法进行，由食品专业学生 10 人组成感官评定小组，具体从色泽、气味、形态、口感进行评价，共分为优、良、中、差四个等级，具体评分标准见表 1。

表 1 紫米粉丝感官评分标准

Table 1 Sensory scoring standards of purple rice noodles

评价指标	含义	评分分级
色泽	具有纯粹的紫米色泽，颜色均匀，透明	优、良、中、差
气味	拥有紫米独特的清香味，气味纯正	优、良、中、差
形态	具有光滑的表面和完整的形态	优、良、中、差
口感	弹性好，爽滑不粘牙，软硬适中	优、良、中、差

1.2.5.4 紫米粉丝品质综合评分方法 紫米粉丝品质涉及多方面，本文以蒸煮品质、花色苷含量及保留率、感官品质，按照权重计算后进行综合评判。因其中不同的指标计算具有不同的量纲，不适直接累加，因此先将数据进行标准化处理与隶属度计算后，再赋予各指标不同权重，进行综合评分值 T 的计算。其中，三种指标的标准化处理均采用公式(7)；蒸煮品质的隶属度运算采用公式(8)；花色苷与感官评价隶属度采用公式(9)；赋予各指标权重为蒸煮品质 0.4，营养品质 0.3，感官品质 0.3，综合评分采用公式(10)。

$$X_i=\frac{x_i-\bar{x}}{\sigma} \quad 式（7）$$

$$Z_{蒸煮}=\frac{X_M-X_i}{X_M-X_m} \quad 式（8）$$

$$Z_{花色苷及感官}=\frac{X_i-X_m}{X_M-X_m} \quad 式（9）$$

$$T=0.4\times Z_{蒸煮}+0.3\times Z_{花色苷}+0.3\times Z_{感官} \quad 式（10）$$

式中：X_i 为米粉丝指标标准化值；x_i 为各米粉丝数据值；$\bar{x}$为数据平均值；σ 为数据标准差；Z 为米粉丝指标的隶属度；X_M 为米粉丝标准化数据最大值；X_m 为米粉丝标准化数据最小值；T 为米粉丝综合评分。

1.3 数据处理

所有实验进行三次重复，结果以平均值±标准差表示。本文运用 SPSS 24.0 及 Excel 对数据进行处理分析，使用 Origin 2017 作图。

2 结果与分析

2.1 复配粉的原料性质与淀粉特性

2.1.1 复配粉的基础理化性质 一般来说，直链淀粉赋予了米粉丝硬度及弹性基础，米粉丝加工原料的直链淀粉水平通常要达到 24 g/100 g 以上为佳[9]，如果制作米粉丝的原料直链淀粉含量过低，则会导致米粉丝加工难成型、蒸煮糊汤严重及口感无嚼劲等问题。而由表 2 可知，纯紫米粉直链淀粉含量约为 15.75 g/100 g，远低于 24 g/100 g 的标准。通过混配高直链淀粉籼米粉来改善原料粉性质，可以改善紫米料粉加工难成型的状况，提高成品粉丝的蒸煮品质。如表 2 所示，试验用纯籼米粉的直链淀粉含量为 29.56 g/100 g，随着复配粉中紫米粉含量占比提升，复配粉直链淀粉含量呈明显下降趋势，由最高时 28.22 g/100 g 下降至最低的 22.64 g/100 g，直链淀粉

表 2　复配粉的基础理化性质

Table 2　Basic physical and chemical properties of compound powder

复配比例 籼米:紫米	复配粉基础理化性质			
	直链淀粉含量（干基）(g/100 g)	溶解度 (g/100 g)	膨润力 (g/g)	胶稠度 (mm)
10:0(籼米粉)	29.56±0.42^{a}	4.81±0.48^{e}	6.22±0.32^{f}	51.0±2.65^{a}
9:1	28.22±0.34^{a}	6.06±0.03^{d}	6.65±0.20^{e}	37.7±2.52^{c}
8:2	26.86±0.20^{b}	6.24±0.00^{d}	6.80±0.15^{de}	27.7±1.53^{d}
7:3	25.46±0.48^{c}	6.40±0.00^{cd}	7.17±0.29^{d}	24.0±1.00^{de}
6:4	23.87±0.20^{d}	6.70±0.04^{bc}	7.65±0.10^{c}	22.0±1.00^{e}
5:5	22.64±0.29^{e}	6.96±0.26^{b}	8.03±0.27^{b}	21.0±1.00^{e}
0:10(紫米粉)	15.75±0.29^{f}	10.02±0.26^{a}	12.85±0.07^{a}	46.0±4.36^{b}

注：同一列上英文字母的不同表示均值之间存在显著性差异（P<0.05）；表 3、表4同。

含量减少会降低淀粉糊化老化形成的凝胶的结构强度，减弱凝胶稳定性，最终导致紫米粉丝成型困难以及蒸煮时易糊汤、断条率高等问题。前人研究表明[10−12]，原料直链淀粉含量维持在 24%~30% 时，制作的米粉丝品质更佳。

米粉丝在烹煮过程中，糊汤严重与否同淀粉分子的溶出情况关系紧密[13]。从表 2 可以看到，紫米粉的溶解度为 10.02 g/100 g，明显高于籼米粉的 4.81 g/100 g，伴随着紫米粉占比的增大，复配粉溶解度由 6.06 g/100 g 上升至 6.96 g/100 g，膨润力也随之从 6.65 g/g 增大到 8.03 g/g，这说明淀粉分子在高温溶液中分散溶出情况加剧，淀粉分子吸水膨胀能力增强，这不仅会影响紫米粉丝糊汤程度，还会出现紫米粉丝过度吸水导致嚼劲偏小的问题，因此需要避免紫米粉过量添加。范代超[14]、卫攀杰等[15] 研究也发现，当原料溶解度与膨润力偏大时，容易引起米粉丝发粘并条、没有嚼劲等问题。

胶稠度是指米胶在平面上的延伸长度[16]，反映了米胶的柔软性与黏滞性，米胶长度 40 mm 以下为硬稠度，41~60 mm 为中软稠度。由表 2 发现，紫米粉与籼米粉的胶稠度分别为 46 mm 与 51 mm，都属于中软稠度，但当紫米粉与籼米粉复配后，随着紫米粉含量占比增大，其胶稠度迅速下降，从 37.7 mm 下降至 21.0 mm，均迈入硬稠度范围。但上述紫米粉占比增大，直链淀粉含量降低，胶稠度也降低，这一变化与寻常“直链淀粉含量越低，胶稠度越大”这一规律相矛盾。这是因为在表面粘性不强的籼米类研究当中，直链淀粉含量变化能够直接增强或减弱米胶结构，使米胶流动性发生改变，直链淀粉含量越少，米胶越松软，流动性越强，延伸距离越长，胶稠度也应更大。但紫米糯性较强，也就是米胶表面粘性较强[17]，这使得紫米米胶受到的阻力较籼米更大，因此即便紫米直链淀粉含量较低，形成的米胶松软，但其胶稠度仍处于硬稠度水平，当籼米与紫米进行复配后，其所形成的米胶兼具稳定结构与较高表面粘性，因此胶稠度会进一步下降。孙庆杰等[18]、吴卫国等[19] 和徐晓辉[20] 研究发现，当原料胶稠度在 30~45 mm 时，更有利米粉丝的成型与挤丝。

2.1.2　复配粉的糊化特性　米粉丝的形成机理与面条不同，没有面筋蛋白提供骨架基础，需要依靠淀粉糊化和回生所形成的凝胶作为结构支撑，因此淀粉体系的糊化特性是影响米粉丝品质的重要特性之一[21]。

一般而言，低谷黏度与最终黏度反映的是原料在加工过程中耐剪切能力的强弱，低谷黏度与最终黏度较高的原料加工的米粉丝蒸煮损失较小，在一定范围内，低谷黏度与最终黏度越大，其加工米粉丝的蒸煮品质也越佳[14]。由表 3 可知，紫米粉与籼米粉间糊化特性差异较大，随着紫米粉含量占比增加，复配粉的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度均呈现先上升后缓慢下降的变化，峰值几乎均在复配比例为 7:3 时出现，峰值数据分别为 4053、2368、4826 cP，这说明 30% 的紫米粉添加量已经使糊化黏度达到峰值。

衰减值与回生值分别代表的是淀粉糊热糊稳定性及冷糊稳定性。如表 3 所示，随着紫米粉添加量增加，复配粉衰减值呈不断增大的趋势，从 1575 cP 增大到 1698 cP，当衰减值增大时，说明淀粉糊热稳定性在减弱，淀粉结构越容易在高温下解体[22]，因而较低水平的衰减值更有利于紫米粉丝的加工。而回生值则是呈现不断下降的变化，由 2317 cP 下降到 2197 cP，回生值能表征淀粉糊短期老化趋势的强弱，当回生值较低时，淀粉糊形成凝胶的速度缓慢[23]，紫米粉丝老化塑型的程度较低，且凝胶稳定性较差，不利于提升紫米粉丝品质，为了保持复配粉衰减值与回生值在适宜水平，紫米粉添加量不宜过多。

表 3　复配粉的糊化特性

Table 3　Gelatinization characteristics of compound powder

复配比例 籼米:紫米	复配粉糊化特性					
	峰值黏度(cP)	低谷黏度(cP)	衰减值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)	糊化温度(℃)
10:0(籼米粉)	3905±11^{e}	2356±8^{bc}	1538±7^{g}	4697±9^{d}	2338±5^{a}	82.30±0.10^{a}
9:1	3885±10^{f}	2253±8^{d}	1575±4^{f}	4638±11^{e}	2317±8^{b}	82.62±0.51^{a}
8:2	4000±10^{b}	2407±6^{a}	1601±7^{e}	4791±7^{b}	2277±4^{c}	82.27±0.06^{a}
7:3	4053±10^{a}	2368±17^{b}	1639±5^{d}	4826±6^{a}	2244±6^{d}	82.33±0.06^{a}
6:4	3975±6^{c}	2345±14^{c}	1678±8^{c}	4799±11^{b}	2218±5^{e}	81.05±0.44^{b}
5:5	3948±7^{d}	2255±10^{d}	1698±6^{b}	4727±12^{c}	2197±5^{f}	81.26±0.49^{b}
0:10(紫米粉)	3759±10^{g}	1931±9^{e}	1816±16^{a}	3954±18^{f}	2017±17^{g}	76.60±0.15^{c}

2.1.3 复配粉的凝胶特性 淀粉凝胶是指淀粉颗粒吸水膨胀后互相连接形成的含水网状复合物，作为紫米粉丝原料选择而言，主要关注的是淀粉凝胶的质构特性与水合特性[24]。

凝胶作为紫米粉丝的主体骨架，能够通过质构硬度反映出其结构强度，进而判断成品米粉丝的品质。由表 4 中可知，籼米凝胶硬度最大，为 2213 gf，远高于紫米凝胶的 1482 gf，且随着紫米粉占比增大，硬度呈现显著下降趋势，由 2076 gf 减小到 1413 gf，这是因为淀粉体系中直链淀粉含量的减少，会使联结凝胶结构的微晶束氢键数量减少，减弱了结构强度[25]，导致凝胶硬度降低。粘结性是指样品经过加压变形后，其表面粘性会产生负向的力量，数值绝对值越大，说明产生的负向力量越大，可以解释为凝胶粘牙性增强。由上表可以看到，紫米凝胶粘结性最强，达到−2.11 gf，且随着紫米粉占比增大，复配粉的粘结性从−1.18 gf 增强至−1.91 gf，当粘结性过强时，则会导致紫米粉丝表面的爽滑性会变差，口感黏连。

表 4 复配粉的凝胶特性

Table 4 Gel characteristics of compound powder

复配比例 籼米:紫米	质构特性		水合特性	
	硬度(gf)	粘结性(gf)	持水性H(%)	失重率L(%)
10:0(籼米粉)	2213±22^{a}	−1.07±0.29^{a}	12.33±0.13^{a}	4.92±0.03^{e}
9:1	2076±30^{b}	−1.18±0.04^{a}	10.22±0.44^{b}	6.57±0.14^{d}
8:2	1897±20^{c}	−1.30±0.00^{ab}	9.77±0.22^{bc}	7.47±0.12^{c}
7:3	1730±20^{d}	−1.42±0.00^{b}	9.43±0.45^{c}	7.95±0.28^{b}
6:4	1583±19^{e}	−1.52±0.08^{b}	8.69±0.22^{d}	8.68±0.14^{a}
5:5	1413±23^{g}	−1.91±0.01^{c}	7.62±0.08^{e}	8.88±0.34^{a}
0:10(紫米粉)	1482±33^{f}	−2.11±0.13^{c}	5.88±0.10^{f}	7.97±0.22^{b}

持水性反映的是淀粉凝胶内部保持水分的能力，持水性越高，水分向外逃离的能力越差[9]。由表 4 可知，随着紫米粉添加量增加，复配粉的持水力呈下降趋势，持水性由 10.22% 降低至 7.62%，而失重率的变化趋势则相反，当紫米粉添加量达到 30% 后，复配粉失重率从 6.57% 上升至 7.95%，接近于纯紫米粉失重率。上述水合特性的变化主要与原料的直链淀粉含量与溶解度相关，当复配粉中直链淀粉含量较高时，溶解度较小，所形成的凝胶网络更加致密均匀，能捕捉更多的游离水，减少淀粉与水分的渗出[6]，而凝胶持水性增加，失重率减少，则更有利于凝胶的形成[14]。

2.2 米粉丝产品品质

2.2.1 紫米粉丝的蒸煮品质 米粉丝的蒸煮品质主要分为三个方面，分别为复水时间、断条率与蒸煮损失率。复水时间是指米粉丝在烹煮过程中从回生状态恢复到糊化状态所需的时间，反映的是米粉丝烹煮的难易程度，其中复水时间快慢能用来判断米粉丝烹煮的便利程度，而断条率与蒸煮损失率则是直接反映米粉丝在烹制过程中碎条与糊汤的严重程度[26]。

由图 1 可知，紫米粉丝的复水时间、断条率与蒸煮损失率均随着紫米粉占比增大而呈现明显上升趋势，当紫米粉添加配比大于 7:3，即紫米粉添加量超过 30% 后，断条率从最低水平 9.67% 上升到 19%，蒸煮损失率由最低水平 30.46% 上升至 37.97%，均达到较高水平。这是因为断条率及蒸煮损失率的变化直接与紫米粉丝凝胶强度挂钩[27]，由凝胶性质可知，紫米粉占比越大，形成的凝胶强度越弱，稳定性越差，会使紫米粉丝在烹煮过程中解体，降低紫米粉丝蒸煮品质。市面上籼米粉丝的蒸煮损失率约在 15%~25% 间，复水时间约在 300 s[28] 内，而本文中紫米粉丝最低蒸煮损失率和最短复水时间在 9:1 时出现，分别为 30.46% 与 480 s，仍会稍大于籼米粉丝，这是因为紫米粉溶解度大且粗纤维含量较高[17]，溶解度大导致淀粉大量溶出，纤维分子则散乱分布在凝胶结构中，破坏了凝胶结构连续性，进而影响水分渗透连贯性[28]，因而与籼米粉丝相比，紫米粉丝的复水时间较长、蒸煮损失率偏高。综上，为了避免紫米粉过量添加使紫米粉丝品质下降，籼米粉:紫米粉的复配比例不宜大于 7:3，即紫米粉添加量不应超过 30%。

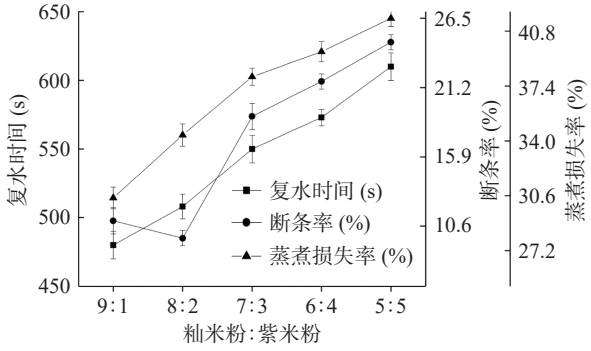

图 1 不同配比复配粉制作的紫米粉丝的蒸煮品质

Fig.1 The cooking quality of purple rice noodles made from rice powder blends with different proportions

2.2.2 紫米粉丝的花色苷含量及保留率 花色苷是花青素与糖通过糖苷键结合而成的一类天然食用色素，试验紫米的花色苷含量为 140 mg/100 g，含量丰富，能够赋予紫米粉丝独特的颜色，并具备抗氧化活性[29]，因此花色苷含量及保留率是影响紫米粉丝营养及感官品质的重要指标。

由图 2 可以看出，随着紫米粉占比的增大，紫米粉丝花色苷含量呈上升态势，但当紫米粉添加配比大于 7:3，即紫米粉添加量超过 30% 后，花色苷含量的增长明显放缓，相应的花色苷保留率则是先上升后快速下降的态势，并在籼米粉:紫米粉配比为 8:2 时，花色苷保留率达到峰值。由胶稠度与凝胶特性结果可知，当紫米粉占比偏大时，所形成的紫米胶体流动性差，结构松散且粘结性强，这会造成紫米凝胶在螺杆与机腔中的递进困难，延长其在高温机腔中的滞留时间，较强的粘性会加剧米胶与螺杆的摩擦，使得热应力破坏增强[30]，不仅加速了热敏性物质花色苷的降解[31]，还会导致紫米粉丝挤丝困难。因此控制籼米粉与紫米粉配比在 8:2~7:3 间，不仅能有效地提高花

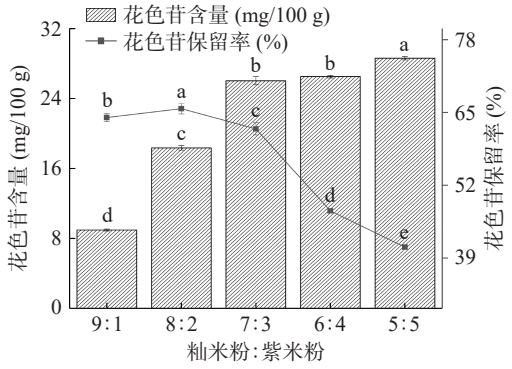

图 2　不同配比复配粉制作的紫米粉丝的花色苷含量及保留率

Fig.2　The anthocyanin content and retention rate of purple rice noodles made from rice powder blends with different proportions

注：不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

色苷的保留率，维持花色苷含量的较高水平，保持米粉丝纯粹的紫色，还能解决挤丝困难的问题。

2.2.3　紫米粉丝的感官品质　感官品质评价是消费者对产品接受程度的直接表现。本文使用模糊数学评价法进行紫米粉丝的感官品质评价，评价的内容包括紫米粉丝的色泽、气味、组织形态、口感等四个方面，评定小组由 10 名评分人员组成，评价结果如表 5 所示。

表 5　不同配比复配粉制作的紫米粉丝的感官投票结果

Table 5　The sensory voting results of purple rice noodles made from rice powder blends with different proportions

粘米粉:紫米粉	色泽(20%)				气味(20%)				形态(25%)				口感(35%)			
	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差	优	良	中	差
9:1	0	6	4	0	3	6	1	0	2	8	0	0	2	7	1	0
8:2	8	2	0	0	7	2	1	0	7	3	0	0	8	2	0	0
7:3	0	2	7	1	2	5	3	0	0	5	5	0	1	5	4	0
6:4	0	1	6	3	0	6	4	0	0	3	7	0	0	2	8	0
5:5	0	0	4	6	0	7	3	0	0	0	3	7	0	0	4	6

根据评分小组人员意见将色泽、气味、组织形态、口感等四个评价因素的权重设置为 a=(0.2, 0.2, 0.25, 0.35)，再以各样品投票结果除于总评价人数得到模糊矩阵 R，由矩阵 a 乘以上述各样品的模糊矩阵 R，可以得到该样品综合评价结果 Y，以复配比例为 9:1 为例，由 $Y_1=a\cdot R_1$ 得到：

$$Y_1=a\cdot R_1=(0.2,\ 0.2,\ 0.25,\ 0.35)\cdot\begin{bmatrix}0.0 & 0.6 & 0.4 & 0.0\\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0.0\\ 0.2 & 0.8 & 0.0 & 0.0\\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0.0\end{bmatrix}$$

为了使结果更加直观，设定优为 90 分、良为 80 分、中等为 70 分、差为 60 分，将综合评价结果分别乘以对应评价分数并进行加和，最终得到各个样品的模糊综合评价总分。如表 6 所示。当复配比例为 8:2 时，紫米粉丝感官评价总分最高，当紫米粉添加配比大于 7:3 时，即紫米粉添加量超过 30% 后，紫米粉丝的感官品质迅速下降。

表 6　紫米粉丝模糊评价结果

Table 6　Fuzzy evaluation results of purple rice noodles

粘米粉:紫米粉	评价结果集	感官评价总分
9:1	(0.180, 0.685, 0.135, 0.000)	80.45
8:2	(0.755, 0.225, 0.020, 0.000)	87.35
7:3	(0.075, 0.440, 0.465, 0.000)	74.51
6:4	(0.000, 0.285, 0.655, 0.060)	68.69
5:5	(0.000, 0.140, 0.355, 0.505)	36.35

2.2.4　紫米粉丝综合评价　表 7 是不同配比紫米粉丝的综合评价表，由紫米粉丝的蒸煮品质、花色苷含量与保留率及感官品质构成，首先将各品质结果经过标准化处理，隶属度运算，再乘以各指标对应权重后进行得分加和，得到紫米粉丝的最终评价结果。由表 7 可知，在蒸煮品质方面，复配比例为 9:1 时，紫米粉丝具备最好的蒸煮品质；在花色苷含量与保留率方面，复配比例为 7:3 时，花色苷的含量较高且保留率最佳；在感官评价上，当复配比例为 8:2 时，紫米粉丝感官品质最优。综合各因素考虑，得到复配最适比例为籼米粉：紫米粉为 8:2，此时紫米粉丝的综合品质最佳。最佳配比制作的紫米粉丝蒸煮损失率为 34.37%，稍高于市售米粉丝的 15%~25%，断条率为 9.67% 与市售米粉丝的 10% 相当，蒸煮品质整体与市售水平相近[10, 15]；而紫米粉丝花色苷含量 18.36 mg/100 g，保留率达 65.68%，色泽呈紫红，带有紫米清香，感官品质良好，具有独特优势。

表 7　不同配比紫米粉丝的综合评价

Table 7　Comprehensive evaluation of purple rice noodles with different proportions

粘米粉:紫米粉	实验结果			最终评分	名次
	$Z_{蒸煮}$(40%)	$Z_{花色苷}$(30%)	$Z_{感官}$(30%)		
9:1	1.0000	0.0000	0.8647	0.6594	3
8:2	0.8275	0.6765	1.0000	0.8339	1
7:3	0.3996	1.0000	0.7483	0.6843	2
6:4	0.2304	0.3462	0.6340	0.3862	4
5:5	0.0000	0.1794	0.0000	0.0538	5

3　结论

当籼米粉与紫米粉混配比例在 9:1~7:3 间，即直链淀粉含量为 25.46~28.22 g/100 g，淀粉溶解度为 6.06~6.40 g/100 g，膨润力为 6.65~7.17 g/g，胶稠度为 24.0~37.7 mm，衰减值为 1575~1639 cP，回生值为 2244~2317 cP，凝胶硬度为 1703~2076 gf，粘结性为−1.42~−1.18 gf，持水性为 9.43%~10.22%，失重率为 6.57%~7.95%。该比例范围内制作出的紫米粉丝具备较好的蒸煮、营养及感官品质，为其他杂粮米粉丝的生产提供了数据参考。

优选制作紫米粉丝的复配粉比例为籼米粉：紫米粉为 8:2，在该配比下使用双螺杆挤压技术制作的紫米粉丝成品品质如下：复水时间为 508 s，断条率

为 9.67%，蒸煮损失率为 34.37%，与市售白米粉丝相当，花色苷含量为 18.36 mg/100 g，花色苷保留率达到 65.68%，粉丝颜色紫红，带有紫米清香，感官品质良好。选用籼米与紫米粉进行混配，有效解决了紫米粉丝加工中出现的挤丝困难及并条、成品粉丝复水时间长、易糊汤、断条率高等问题。

随着复配粉中紫米粉占比增大，复配粉的直链淀粉含量下降、溶解度与膨润力增大，也伴随着衰减值的上升与回生值的下降，这使得凝胶强度变弱，淀粉分子溶出与吸水溶胀情况加剧，进而会导致紫米粉丝出现发粘并条，断条率高，易糊汤及口感无嚼劲等问题；硬胶稠度、较低的凝胶硬度及较强的粘结性，反映了紫米凝胶较差的流动性、松散的结构以及较强的粘结性，会造成紫米粉丝挤丝困难与花色苷保留率的下降。

参考文献

[1] 伍怡斐, 钟锦耀, 郑经绍, 等. 贮藏环境与辅助添加物对紫米花色苷稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 47−53. [WU Y F, ZHONG J Y, ZHENG J S, et al. The effect of storage environment and auxiliary additives on the stability of purple rice anthocyanins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(16): 47−53.]

[2] KHOO H K, AZRINA A, SOU T T, et al. Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits[J]. Food & Nutrition Research, 2017, 61(1): 1361779.

[3] 苟青松, 吴凡, 王展, 等. 压榨型干米粉专用米关键指标的研究[J]. 食品科技, 2020, 45(2): 170−176. [GOU Q S, WU F, WANG Z, et al. Research on key indicators of special rice for pressed dry rice noodles[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 170−176.]

[4] 郭静璇. 挤压法马铃薯米线的生产工艺和品质改良研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [GUO J X. Research on the production process and quality improvement of potato noodles by extrusion method[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]

[5] 方浩标, 郑经绍, 许立益, 等. 紫糙米粉挤压工艺优化及其理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 195−202. [FANG H B, ZHENG J S, XU L Y, et al. Optimization of the extrusion process of purple brown rice flour and analysis of its physical and chemical properties[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(10): 195−202.]

[6] 郎凯红. 大米凝胶特性的评价与检测 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2012. [LANG K H. Evaluation and testing of rice gel properties[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.]

[7] 李琳, 陈洁, 陈玲. 玉米淀粉对大米粉凝胶特性的影响[J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2019, 40(4): 7−11, 40. [LI L, CHEN J, CHEN L. The effect of corn starch on the gel properties of rice flour[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 7−11, 40.]

[8] 修茹燕. 富含花色苷的发芽黑米速食粥及体外抗氧化研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016. [XIU R Y. Sprouted black rice instant porridge rich in anthocyanins and *in vitro* antioxidant research[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.]

[9] KAUR M, SANDHU K S, LIM S T. Microstructure, physicochemical propoerties and *in vitro* digestbility of starches from different Indian lentil (*Lens culinaris*) cultivars[J]. Carbohydate Polymers, 2010, 79(2): 349−355.

[10] 王永辉, 张业辉, 张名位, 等. 不同水稻品种大米直链淀粉含量对加工米粉丝品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 109−120. [WANG Y H, ZHANG Y H, ZHANG M W, et al. Effect of rice amylose content of different rice varieties on the quality of processed rice vermicelli[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2013, 46(1): 109−120.]

[11] 张聪男, 薛薇, 冯晓宇, 等. 鲜湿米粉原料加工适应性及配米技术研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(11): 1−7. [ZHANG C N, XUE W, FENG X Y, et al. Research on processing adaptability of fresh wet rice noodles and rice blending technology[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(11): 1−7.]

[12] 雷婉莹, 吴卫国, 廖卢艳, 等. 鲜湿米粉品质评价及原料选择[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 74−79. [LEI W Y, WU W G, LIAO L Y, et al. Quality evaluation and raw material selection of fresh wet rice noodles[J]. Food Science, 2020, 41(1): 74−79.]

[13] JIAO A Q, YANG Y Y, LI Y, et al. Structural properties of rice flour as affected by the addition of pea starch and its effects on textural properties of extruded rice noodles[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1761830.

[14] 范代超. 几种粉丝淀粉特性及其对食用品质的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [FAN D C. Study on the characteristics of several vermicelli starches and their effects on eating quality[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.]

[15] 卫攀杰, 陈洁, 许飞, 等. 籼米品种对鲜湿米粉品质影响的研究[J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2020, 41(5): 38−43, 49. [WEI P J, CHEN J, XU F, et al. The effect of indica rice varieties on the quality of fresh wet rice noodles[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 38−43, 49.]

[16] 张慧杰, 王步军. 影响米粉品质的稻米质量指标分析[J]. 农产品质量与安全, 2020(3): 78−81. [ZHANG H J, WANG B J. Analysis of rice quality indicators affecting the quality of rice noodles[J]. Quality and Safety of Agricultural Products, 2020(3): 78−81.]

[17] 郑瑞龙, 索婧怡, 钮成拓, 等. 紫 (黑) 米在酿酒行业中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 263−268. [ZHENG R L, SUO J Y, NIU C T, et al. Application of purple (black) rice in wine industry[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(23): 263−268.]

[18] 孙庆杰, 丁文平, 丁霄霖, 等. 米粉 (米线) 原料标准的研究[J]. 中国粮油报, 2004(1): 12−15. [SUN Q J, DING W P, DING X L, et al. Research on the raw material standard of rice noodles (rice noodles)[J]. China Cereals and Oils News, 2004(1): 12−15.]

[19] 吴卫国, 张喻, 肖海秋, 等. 原料大米特性与米粉产品品质关系的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2005(9): 21−24. [WU W G, ZHANG Y, XIAO H Q, et al. Study on the relationship between the characteristics of raw rice and the quality of rice noodles[J]. Food and Feed Industry, 2005(9): 21−24.]

［20］ 徐晓辉. 鲜湿米粉原料工艺特性的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2014. ［XU X H. Research on the process characteristics of fresh wet rice noodles[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.］

［21］ 于新, 刘丽. 传统米制品加工技术 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2014: 1−12. ［YU X, LIU L. Traditional rice product processing technology[M]. Beijing: China Textile Press, 2014: 1−12.］

［22］ YI C P, ZHU H, BAO J S, et al. The texture of fresh rice noodles as affected by the physicochemical properties and starch fine structure of aged paddy[J]. LWT, 2020, 130l: 109610.

［23］ 卫萍, 张雅媛, 游向荣, 等. 马铃薯-籼米粉特性及其挤压成型品质[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 113−120. ［WEI P, ZHANG Y Y, YOU X R, et al. Characteristics of potato-indica rice noodles and their extrusion molding quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 113−120.］

［24］ YI C P, ZHU H, ZHANG Y, et al. The role of indica starch in the mechanism of formation of fresh rice noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103212.

［25］ 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2017. ［DONG B B. The gelatinization and rheological properties of eight starches and their relationship with gel properties[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.］

［26］ KANG M J K, IN Y B, HYEON G L. Rice noodle enriched with okara: Cooking property, texture, and *in vitro* starch digestibility[J]. Food Bioscience, 2018, 22: 178−183.

［27］ KHUNAE P, TRAN T, SIRIVONGPAISAL P. Effect of heat-moisture treatment on structural and thermal properties of rice starches differing in amylose content[J]. Starch, 2010, 59(12): 593−599.

［28］ 王佳玉, 陈碧莹, 陈凤莲, 等. 不同杂粮添加对籼米粉粉质特性及挤压米粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 66−72. ［WANG J Y, CHEN B Y, CHEN F L, et al. The effect of different cereals on the silty characteristics of indica rice noodles and the quality characteristics of extruded rice noodles[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(8): 66−72.］

［29］ CARMEB-ALINA B, CAMELIA V. Polyphenolic content and antioxidant properties of black rice flour[J]. Annals of the University Dunarea de Jos of Galati Fascicle VI:Food Technology, 2017, 41(2): 75−85.

［30］ HIRTH M, LEITER A, BECK S M, et al. Effect of extrusion cooking process parameters on the retention of bilberry anthocyanins in starch based food[J]. Journal of Food Engineering, 2014 (125): 139−146.

［31］ HIRTH M, PREIß R, MAYER-MIEBACH E, et al. Influence of HTST extrusion cooking process parameters on the stability of anthocyanins, procyanidins and hydroxycinnamic acids as the main bioactive chokeberry polyphenols[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 511−516.