

国内 69 份穆子营养品质与籽粒颜色关系初探

胡丽琴¹ 王素华¹ 张璐¹ 杨学乐¹ 何录秋¹ 汤睿² 李基光¹

(¹湖南省作物研究所, 410125, 湖南长沙; ²湖南省农业科学院, 410125, 湖南长沙)

摘要 本研究测定了 69 份穆子资源的籽粒颜色 (明度: L^* , 红度: a^* , 黄度: b^*) 及淀粉和总黄酮含量等 12 个营养指标, 并根据 L^* 、 a^* 和 b^* 值分析各类粒色的营养指标差异及粒色值与营养指标的相关性。结果表明, 采用聚类分析将 69 份穆子资源分为棕黄色、褐色和黑红色 3 类。黑红色穆子的平均蛋白质、总氨基酸、钙、铁、钾、镁、维生素 B₂ 含量均高于其他颜色穆子, 其中镁含量与其他 2 种粒色穆子都存在极显著差异 ($P < 0.01$)。由相关性结果可知, 钙、镁含量均与 L^* 、 b^* 存在显著负相关 ($P < 0.05$), L^* 和 b^* 越低, 钙和镁含量越高。总糖含量与 L^* 值呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 淀粉与 b^* 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 其余均与粒色值相关性不大。

关键词 穆子; 粒色; 营养指标; 黄酮含量

穆子 [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn] 又名红稗、鸡爪粟, 是禾本科 C₄ 作物^[1]。穆子耐旱、耐瘠薄, 适应性强, 主要在我国贵州、湖南、广西、陕西和西藏等地种植^[2]。穆子富含膳食纤维 (22.0%) 和矿物质 (2.5%~3.5%), 其中钙含量高达 487.0 mg/100 g, 是小麦 (41 mg/100 g)、玉米 (26.0 mg/100 g) 和水稻 (33.0 mg/100 g) 的 10 倍以上, 是牛奶的 3 倍^[3]。穆子蛋白质含量为 6.0%~13.0%, 蛋白质中氨基酸比例均衡, 含有大量的色氨酸、赖氨酸、蛋氨酸等, 其中蛋氨酸在豆类中都少见^[3-4]。另外, 穆子中还含有大量的多酚类物质, 如酚酸类、类黄酮类和鞣酸类等, 传统上常用来治疗胃病, 还可有效治疗糖尿病、高血压、动脉粥样硬化等疾病^[3,5-6]。穆子被美国国家科学院称为潜在的“超级谷物”, 在谷物中营养较优, 是非洲贫困地区人们廉价易得的营养补充剂或婴儿断乳替代品^[4]。

穆子种皮中富含许多对人体健康有益的营养成分^[7]。研究^[8]表明, 种皮颜色深浅在一定程度上可以反映其营养品质, 如彩色青稞的营养品质和抗氧化活性比白色青稞高。芝麻的脂肪含量随粒色加深而下降^[9]。黑藜麦纤维和总氨基酸及抗氧化活性都最高, 但白藜麦粗蛋白、红藜麦淀粉和脂肪含量最高^[10]。另外, 谷子中铁和锌含量不受粒色

影响^[11], 但蛋白质、脂肪和赖氨酸含量与粒色相关, 且在青色籽粒谷子中含量最高^[12]。黄色胡麻的棕榈酸、硬脂酸、亚麻酸、木酚素含量和含油率均比棕色胡麻资源的高^[13]。因此, 种皮颜色深浅与籽粒营养品质关系目前尚无一致定论。在国外, 穆子的种皮颜色主要有棕色、白色、棕红色、铜红色、红黑色和黑色。有报道^[14]称, 白色穆子的蛋白质含量最高, 黑红色穆子的蛋白质和钙含量最低。国内的穆子主要为棕色, 但不同基因型的穆子具有不同深浅的棕色^[15]。国内对穆子粒色和营养品质关系鲜见研究。为此, 本研究以 69 份穆子为研究对象, 分析其粒色指标与淀粉、总黄酮含量等 12 个营养指标的相关性, 通过粒色直观评估穆子营养品质, 提高育种效率, 促进高营养穆子资源的开发和利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 2015-2018 年在第三次全国农作物种质资源普查与收集行动中的 69 份穆子种质资源, 于 2017-2019 年在湖南省农业科学院试验田 (113°5' E, 28°12' N, 海拔 50 m) 进行统一种植。小区采用随机区组排列, 设置 3 个重复, 小区面积 5 m², 株行距 30 cm×50 cm, 穴播, 每穴 2~3 株。

作者简介: 胡丽琴, 主要从事杂粮品质分析及功能特性研究, E-mail: hnliqin1003@126.com

李基光为通信作者, 主要从事作物栽培及育种相关研究, E-mail: 214770366@qq.com; 汤睿为共同通信作者, 主要从事早杂粮育种及加工研究, E-mail: 19542439@qq.com

基金项目: 湖南省农业科技创新专项资金项目 (2023CX94); 国家作物种质资源库 (NCGRC-2024-056); 湖南省农业种质资源保护与利用 (湘财农指 (2023) 0043 号)

收稿日期: 2024-04-11; 修回日期: 2024-04-29; 网络出版日期: 2024-07-30

除草、施肥等田间管理参照高产栽培管理进行，成熟期收获籽粒、晒干，以备后续分析。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 粒色亮度 (L^* 值)、红度 (a^* 值) 和黄度 (b^* 值) 将穆子籽粒置于培养皿中，完全盖住底部，使用 500 lx 的灯光进行照射，用 1200 万像素的摄像机调好焦距进行固定拍摄。利用 Adobe Photoshop 2020 软件的拾色器提取图像中穆子籽粒颜色，即 L^* 、 a^* 和 b^* 值，其中 L^* 值取值范围为 0~100，0 为纯黑，100 为纯白。 a^* 和 b^* 值为色度指数，范围为 -120~+120。 a^* 值越大表示红度越高，越低表示绿色越高； b^* 值越大表示黄度越大，越小表示蓝度越大。每个图像选取 3 个点进行颜色拾取，结果以平均值±标准差表示。

1.2.2 营养指标 选择无病害且饱满的穆子，用粉碎机粉碎，过 80 目筛后避光保存备用。总糖、淀粉、蛋白质、总膳食纤维、总氨基酸、钙、铁、钾、镁和总黄酮含量均委托湖南省食品分析测试中心检测。参照滴定法^[16]测定总糖含量；参照酶水解法^[17]测定淀粉含量；参照凯氏定氮法^[18]测定蛋白质含量；参照酶重量法^[19]测定总膳食纤维含量；参照酸水解法^[20]测定总氨基酸含量，参照火焰原子吸收光谱法^[21]测定镁含量，参照火焰原子吸收光谱法^[22]测定钾含量，参照火焰原子吸收光谱法^[23]测定钙含量，参照火焰原子吸收光谱法^[24]测定铁含量。使用试剂盒（苏州科铭生物技术有限公司）检测维生素 B₁ (VB₁) 和维生素 B₂ (VB₂) 含量。

以芦丁为对照品，甲醇为溶剂，恒温振荡提取总黄酮，采用分光光度法^[25]测定总黄酮含量，步骤稍作改进。具体步骤：称 0.1 g 穆子粉样于 15 mL 离心管中，加入 10 mL 80% 甲醇，40 °C 超声提取 30 min。吸取上层提取液，用 0.22 μm 微孔滤膜过滤。精确吸取 1 mL 样品滤液于 15 mL 离心管中，加入 2 mL 0.1 mol/L 三氯化铝溶液和 3 mL 的 1 mol/L 的乙酸钾水溶液，用 80% 的甲醇加满至 10 mL。静置 0.5 h，在波长 420 nm 处测定。

1.3 数据处理

采用 Excel 进行数据记录和分析，采用 Origin 2019b 软件进行作图，采用 SPSS 26.0 软件进行 K 均值聚类分析、单因素方差 (ANOVA) 分析和 Pearson 相关性分析。采用最小显著差数 (LSD) 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同穆子粒色值及分类

从表 1 可知，穆子的 L^* 最大值为 71.3，最小值为 14.0； a^* 最大值为 32.0，最小值为 1.3； b^* 最大值为 54.7，最小值为 -0.7。其中变异系数最大的为 b^* 值，为 38.6%。其次是 a^* 值，为 31.7%。 L^* 值的变异系数最小，为 25.4%。说明穆子粒色中黄度变化最大，其次是红度，最后是亮度。根据穆子粒色值进行 K 均值聚类分析，将 69 份穆子分成 3 类，第 1 类为棕黄色，第 2 类为褐色，第 3 类为黑红色（图 1），分别有 46、18 和 5 份。

表 1 69 份穆子资源的籽粒颜色分类
Table 1 Grain color classification of 69 finger millet resources

编号 Number	L^*	a^*	b^*	聚类 Cluster	编号 Number	L^*	a^*	b^*	聚类 Cluster
C1	65.7±2.1	15.7±0.6	47.3±4.5	1	C18	60.7±0.6	21.3±2.5	45.7±5.0	1
C2	67.0±4.4	15.7±1.2	38.3±3.2	1	C19	41.7±1.5	21.3±3.5	16.3±2.1	2
C3	61.7±2.1	13.0±5.6	33.3±12.9	1	C20	63.7±1.5	21.3±2.5	50.7±2.3	1
C4	63.3±3.2	15.3±2.1	40.7±6.7	1	C21	53.0±1.7	22.7±3.1	25.3±3.1	2
C5	53.3±3.1	23.3±1.5	48.7±2.5	1	C22	52.7±3.2	18.3±2.3	34.0±2.6	1
C6	52.0±2.6	32.0±3.5	50.7±4.6	1	C23	53.3±1.5	14.0±4.0	30.7±5.9	1
C7	63.7±2.1	18.7±3.8	28.0±1.0	1	C24	51.0±2.6	19.3±1.5	45.0±2.6	1
C8	52.7±1.5	20.3±2.1	43.3±3.1	1	C25	31.0±4.0	15.3±1.5	18.3±0.0	2
C9	54.3±3.1	16.7±2.9	40.0±8.9	1	C26	32.7±2.5	23.0±3.6	18.3±2.5	2
C10	63.0±3.6	15.3±2.5	46.3±2.1	1	C27	41.0±2.6	26.0±1.7	26.3±3.8	2
C11	55.7±1.5	23.3±2.5	39.3±3.5	1	C28	58.7±3.1	15.3±1.5	46.3±2.5	1
C12	55.3±3.2	27.7±1.5	49.0±2.0	1	C29	50.0±2.0	19.0±1.7	34.3±4.0	1
C13	53.7±1.5	12.3±1.5	33.0±3.0	1	C30	59.0±1.0	17.7±2.5	43.0±1.7	1
C14	62.0±1.0	18.3±4.7	45.3±10.8	1	C31	60.0±1.0	19.0±2.6	46.3±5.8	1
C15	54.3±2.1	15.7±1.2	35.3±2.1	1	C32	33.7±2.3	24.7±2.3	24.7±2.3	2
C16	28.7±0.6	13.7±1.5	2.7±4.2	3	C33	32.0±2.6	17.0±1.7	24.3±1.5	2
C17	53.3±1.5	20.7±3.1	36.7±3.2	1	C34	14.0±1.7	4.3±1.2	1.0±0.0	3

续表1 Table 1 (continued)

编号 Number	L^*	a^*	b^*	聚类 Cluster	编号 Number	L^*	a^*	b^*	聚类 Cluster
C35	55.7±2.3	17.7±2.5	35.7±1.5	1	C54	63.7±1.2	14.7±0.6	54.7±1.5	1
C36	56.0±3.0	16.7±1.5	46.3±3.5	1	C55	46.3±3.5	29.3±1.5	46.7±2.9	1
C37	58.3±2.1	19.0±1.0	52.0±2.6	1	C56	47.7±0.6	27.7±1.5	41.3±2.1	1
C38	64.7±1.5	16.3±4.6	42.3±3.5	1	C57	70.7±1.5	20.3±1.5	45.3±3.5	1
C39	17.7±2.1	7.3±3.8	-0.7±0.6	3	C58	47.7±2.5	27.3±2.5	32.7±4.0	2
C40	40.0±1.0	21.0±2.0	18.0±4.0	2	C59	71.3±2.1	1.3±0.6	33.3±1.5	1
C41	53.3±2.1	21.7±3.8	36.0±3.0	1	C60	42.0±4.6	19.0±2.6	27.3±5.5	2
C42	40.7±4.2	23.7±2.9	25.7±0.6	2	C61	40.3±4.9	17.0±1.0	22.0±3.6	2
C43	58.0±1.0	20.7±2.5	40.7±3.8	1	C62	54.0±0.0	16.3±4.0	14.0±4.6	2
C44	57.3±1.5	15.3±1.2	47.3±5.0	1	C63	66.0±5.0	11.0±0.0	45.3±1.5	1
C45	39.7±2.9	17.7±2.1	22.7±2.1	2	C64	69.3±3.2	10.0±2.6	31.7±1.5	1
C46	40.0±2.0	19.0±3.0	24.3±1.2	2	C65	67.0±2.6	10.7±3.8	35.0±2.6	1
C47	38.0±1.7	23.3±2.1	23.0±3.6	2	C66	41.7±2.1	29.3±1.5	34.3±4.5	2
C48	57.0±1.0	19.7±4.0	46.0±3.6	1	C67	56.0±3.0	18.0±3.0	38.0±4.6	1
C49	24.7±2.5	15.0±3.0	2.3±3.1	3	C68	62.7±2.1	11.3±0.6	36.0±1.0	1
C50	39.3±4.5	17.3±2.5	29.7±3.1	2	C69	32.7±3.5	13.0±3.0	11.0±3.5	3
C51	45.7±2.5	31.0±2.0	45.0±3.0	1	最大值 Max.	71.3	32.0	54.7	
C52	64.3±4.2	12.0±4.4	36.3±5.1	1	最小值 Min.	14.0	1.3	-0.7	
C53	50.3±1.5	18.3±1.5	33.3±2.5	1	变异系数 CV (%)	25.4	31.7	38.6	

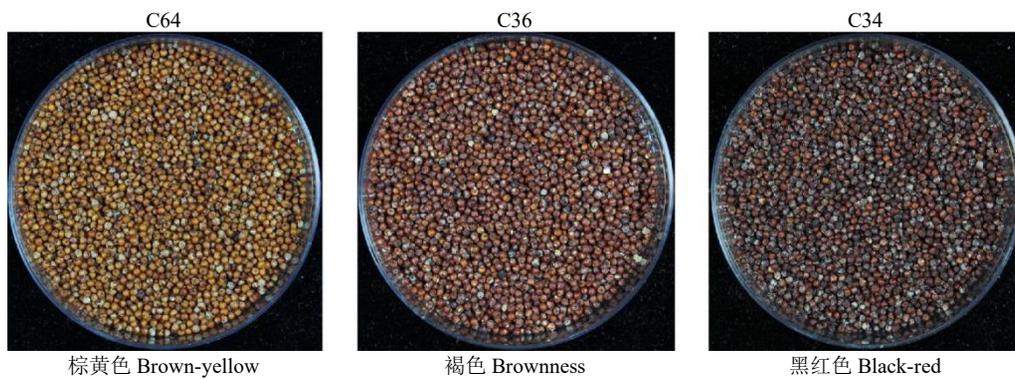


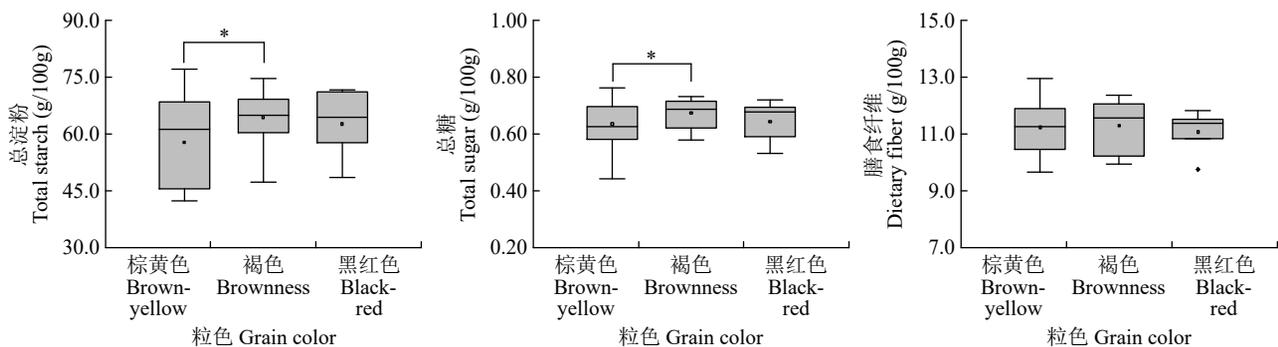
图1 代表性糜子粒色

Fig.1 Grain color of representative finger millet resources

2.2 不同粒色糜子营养指标分析

2.2.1 碳水化合物 由图2可知,褐色糜子总淀粉含量最高,为64.5 g/100 g,其次是黑红色糜子,为

62.7 g/100 g,棕黄色糜子最低,为57.8 g/100 g,其中棕黄色和褐色糜子的总淀粉含量存在显著差异。棕黄色糜子的总淀粉含量在42.4~77.1 g/100 g,



“*”代表差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

“*” indicates significant difference ($P < 0.05$), the same below.

图2 不同粒色糜子碳水化合物含量差异

Fig.2 The difference of carbohydrate contents in finger millet with different grain colors

变异系数最大，为 20.9%，黑红色和褐色籽子的总淀粉含量范围分别为 48.6~71.7 g/100 g 和 47.3~74.7 g/100 g，变异系数分别为 15.5%和 10.8%。总糖方面，平均值最大的为褐色籽子，为 0.7 g/100 g，棕黄色和黑红色籽子平均值都为 0.6 g/100 g。棕黄色和褐色籽子的总糖含量存在显著差异。黑红色籽子总糖含量为 0.5~0.7 g/100 g，变异系数最大，为 12.3%，棕黄色籽子总糖为 0.4~0.8 g/100 g，变异系数为 10.6%，褐色籽子为 0.6~0.7 g/100 g，变异系数为 7.4%。棕黄色、褐色和黑红色籽子的总膳食纤维分别为 10.0~13.0、10.0~12.4、9.8~11.8 g/100 g，变异数分别为 7.8%、7.9%和 7.3%，三者之间均没有

显著差异。

2.2.2 蛋白质和总氨基酸含量 由图 3 可知，棕黄色、褐色和黑红色籽子蛋白质含量没有显著差异，三者变异范围分别为 3.5~7.6、4.3~5.9 和 3.8~6.7 g/100 g，变异系数分别为 21.2%、12.2%和 19.4%。总氨基酸方面，棕黄色和黑红色籽子都与褐色籽子存在显著差异。3 种粒色籽子总氨基酸含量变异范围都较大，其中最大的为黑红色籽子，变异范围为 3.3~6.9 g/100 g，变异系数为 39.6%，其次是棕黄色籽子，范围为 2.7~7.1 g/100 g，变异系数为 28.9%；褐色籽子变异范围最小，为 2.7~6.1 g/100 g，变异系数为 22.9%。

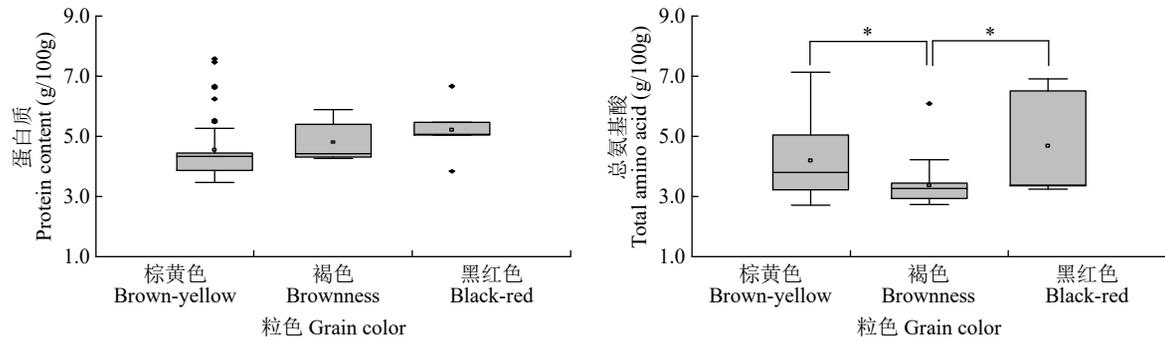
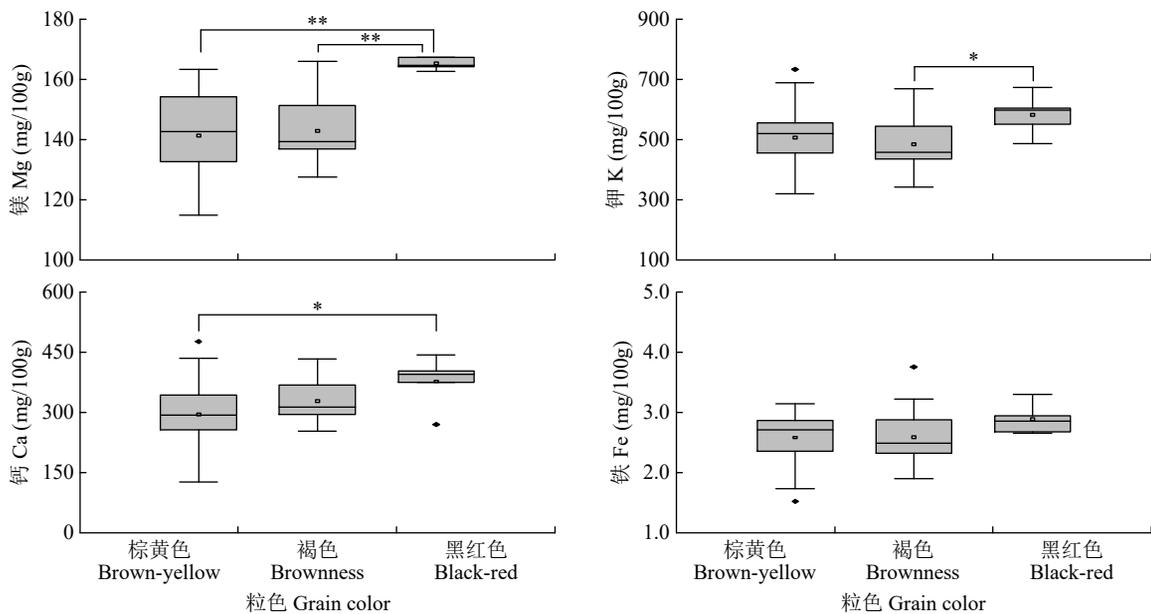


图 3 不同粒色籽子蛋白质和总氨基酸含量差异

Fig.3 The difference of protein and total amino acid contents in finger millet with different grain colors

2.2.3 矿物质含量 由图 4 可知，黑红色籽子镁含量平均值最高，为 165.3 mg/100 g，褐色和棕黄色

籽子镁含量平均值分别为 143.0 和 141.5 mg/100 g。棕黄色和褐色籽子都与褐色籽子的镁含量存在



“***”代表差异极显著 ($P < 0.01$)。

“***” indicates extremely significant difference ($P < 0.01$).

图 4 不同粒色籽子矿质元素含量差异

Fig.4 The difference of mineral element contents in finger millet with different grain colors

极显著差异。棕黄色籽粒镁含量变异范围为 115.0~163.3 mg/100 g, 变异系数为 9.9%; 褐色籽粒的变异范围为 127.7~166.0 mg/100 g, 变异系数为 7.8%; 褐色籽粒变异范围为 162.7~167.3 mg/100 g, 变异系数最小, 仅为 1.2%。钾含量方面, 黑红色籽粒平均值最大, 为 583.4 mg/100 g; 其次是棕黄色和褐色籽粒, 钾含量平均值分别为 507.1 和 484.9 mg/100 g。黑红色和褐色籽粒钾含量存在显著差异。钾含量变动范围最大的是棕黄色籽粒, 为 321.7~734.0 mg/100 g, 变异系数为 18.9%; 其次为褐色籽粒, 范围为 342.7~669.0 mg/100 g, 变异系数为 15.8%; 变异范围最小的为黑红色籽粒。钙含量方面, 黑红色籽粒钙含量平均值最高, 为 377.9 mg/100 g, 其次是褐色籽粒, 为 329.5 mg/100 g, 最低的为棕黄色籽粒, 为 294.9 mg/100 g。黑红色和棕黄色籽粒钙含量存在显著差异。钙含量变动范

围最大的为棕黄色籽粒, 其次是黑红色和褐色籽粒, 范围分别为 127.7~477.0、270.7~443.0 和 253.3~433.3 mg/100 g, 变异系数分别为 27.1%、17.1%和 15.5%。铁含量三者没有显著差异, 平均值最高的是黑红色籽粒, 为 2.9 mg/100 g。由此可知, 黑红色籽粒在矿物质含量方面较其他粒色籽粒具有明显优势。

2.2.4 VB₁和VB₂含量 由图5可知, VB₁和VB₂含量在棕黄色、褐色和黑红色籽粒间都没有显著差异。棕黄色、褐色和黑红色籽粒的VB₁范围分别为0.2~0.3、0.2~0.3和0.2~0.3 mg/100 g, 黑红色籽粒变异系数最大, 为 15.3%, 其次是褐色籽粒和棕黄色籽粒, 分别为 8.4%和 7.5%。棕黄色、褐色和黑红色籽粒的VB₂范围分别为0.1~0.2、0.1~0.2和0.1~0.2 mg/100 g, 三者变异系数都较小, 分别为 5.4%、5.9%和 4.9%。

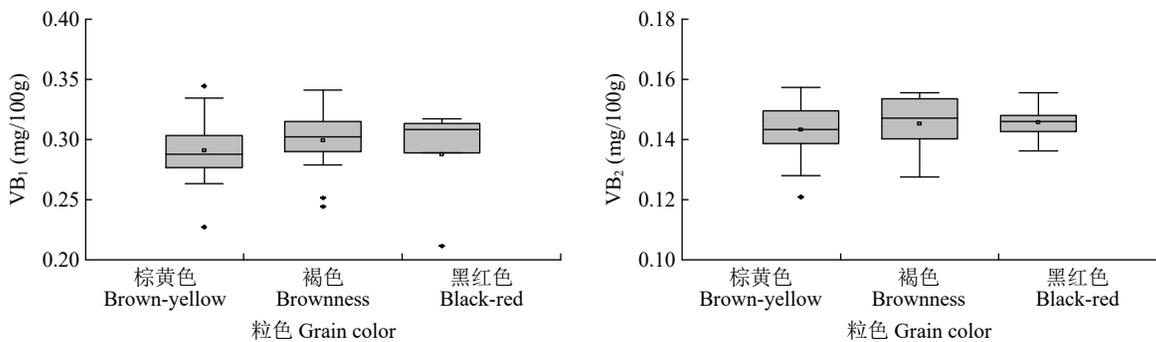


图5 不同粒色籽粒维生素B₁和维生素B₂含量差异

Fig.5 The difference of VB₁ and VB₂ contents in finger millet with different grain colors

2.2.5 总黄酮含量 由图6可知, 总黄酮平均含量从高到低分别为棕黄色、褐色和黑红色籽粒, 但三者间不存在显著差异。其中黑红色籽粒总黄酮含量变异范围最大, 为 164.7~200.7 mg/100 g, 变异系数为 8.3%; 其次为棕黄色籽粒, 含量为 159.3~196.7 mg/100 g, 变异系数为 5.6%。变异范围最小

的为褐色籽粒, 含量为 164.3~194.7 mg/100 g, 变异系数为 4.9%。

2.3 不同籽粒粒色L*、a*、b*值与营养指标的关联性

对 69 份籽粒资源的粒色L*、a*、b*值与 12 个品质性状进行相关性分析, 结果(表2)表明, 明度(L*)与总淀粉含量和钙含量呈极显著负相关关系, 相关系数分别为-0.323和-0.339; 与镁含量呈显著负相关关系, 相关系数为-0.307。红度(a*值)与营养品质之间都不存在显著差异。黄度(b*值)与镁含量呈极显著负相关关系, 相关系数为-0.322; 与淀粉和钙含量呈显著负相关关系, 相关系数分别为-0.261和-0.273。整体来看, 粒色与钙和镁含量相关性更大, 明度和黄度越低, 钙和镁含量越高。其次是总糖和淀粉与粒色有关, 其余均与粒色相关性不大。

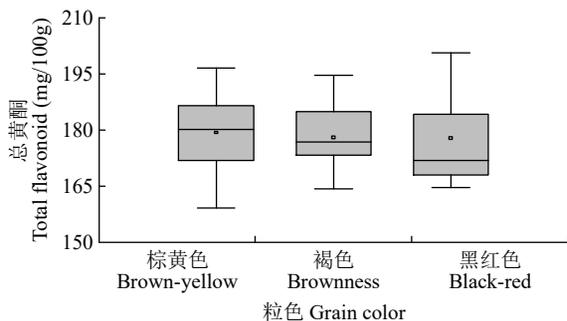


图6 不同粒色籽粒总黄酮含量差异

Fig.6 The difference of total flavonoid content in finger millet with different grain colors

表 2 穆子粒色 L^* 、 a^* 、 b^* 值与与营养指标及总黄酮含量的相关性
Table 2 Correlation of grain color L^* , a^* , b^* values with nutritional indexes and total flavonoid content

指标 Index	TS	SC	DF	PC	AA	Mg	K	Ca	Fe	VB ₁	VB ₂	TF
L^*	-0.323**	-0.202	-0.038	-0.204	0.091	-0.304*	-0.136	-0.339**	-0.175	-0.021	-0.141	0.177
a^*	0.155	-0.083	0.106	-0.183	-0.111	-0.208	-0.142	-0.064	-0.034	0.001	-0.054	-0.166
b^*	-0.152	-0.261*	-0.063	-0.212	0.076	-0.322**	-0.086	-0.273*	-0.057	-0.069	-0.152	0.095

TS: 总糖; SC: 淀粉; DF: 总膳食纤维; PC: 蛋白质; AA: 总氨基酸; TF: 总黄酮。下同。“**”代表相关性显著 ($P < 0.05$), “***”代表相关性极显著 ($P < 0.01$)。

TS: total sugar; SC: starch; DF: total dietary fibre; PC: protein; AA: total amino acid; TF: total flavonoid. The same below. “**” indicates significant correlation ($P < 0.05$), “***” indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

2.4 基于粒色的优异亲本分析

黑红色穆子的整体营养成分较优, 以黑红色穆子作为品质优异亲本分析(表 3)发现, C16 的 VB₂ 含量最高, C34 的总淀粉、蛋白质、Mg、K、Fe

含量最高, C39 的总膳食纤维、Ca 含量最高, C49 的总糖含量最高, C69 的 VB₁ 和总黄酮含量最高。相比主粮稻米、小麦和玉米, 黑红色穆子资源的 Ca、Mg、K 含量具有较强优势, 其中 C34 整体营

表 3 黑红色穆子优异资源亲本分析
Table 3 Parental analysis of the excellent resources of black-red finger millet

指标 Index	黑红色穆子 Black-red finger millet					三大主粮营养成分 ^[3] The nutrients of three main crops		
	C16	C34	C39	C49	C69	稻米 Rice	小麦 Wheat	玉米 Maize
TS (g/100g)	0.6	0.7	0.7	0.7	0.5	—	—	—
SC (g/100g)	48.6	71.7	71.2	57.7	64.5	77.2	64.0	62.3
DF (g/100g)	9.8	11.5	11.8	10.9	11.4	3.7	12.1	12.8
PC (g/100g)	3.8	6.7	5.1	5.1	5.5	7.5	14.4	12.1
AA (g/100g)	6.5	3.3	6.9	3.4	3.4	—	—	—
Mg (mg/100g)	167.0	167.0	165.0	164.0	163.0	32.0	120.0	0.2
K (mg/100g)	598.0	674.0	605.0	552.0	487.0	130.0	363.0	270.0
Ca (mg/100g)	404.0	271.0	443.0	376.0	396.0	10.0	41.0	10.0
Fe (mg/100g)	3.0	3.31	2.66	2.7	2.9	0.5	3.9	3.9
VB ₁ (mg/100g)	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2
VB ₂ (mg/100g)	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0	5.5	0.1
TF (mg/100g)	184.0	165.0	172.0	168.0	201.0	323.0	—	—

养成分均衡且较优, 可作为品质育种的优良亲本。

3 讨论

穆子的功能开发与其特异营养品质密不可分, 不同颜色的穆子营养品质可能存在差异。有研究^[26]表明, 小麦种皮色素含量与籽粒中 Mn 含量达到显著水平, 而与 Fe、Zn、Cu 这 3 种主要有益矿物质元素含量均未达到显著水平。也有研究^[27]表明, 有色大麦与普通大麦籽粒中 Mn、Cu、Zn 元素含量无差异。在本研究中, 黑红色穆子 Ca 含量高于褐色和棕黄色穆子, 并与棕黄色穆子存在显著差异。穆子钙含量范围为 124.7~477.0 mg/100 g, 这与前人^[14]研究的 167.0~487.0 mg/100 g 范围相似。黑红色穆子的 Ca 含量高于平均值, 且比大米等主食 Ca 含量高 10 多倍, 可开发成乳糖不耐症患者的补钙产品^[28]。Ca 和 Mg 可协同吸收, 在本研究中, 黑红

色穆子的 Mg 含量与褐色和棕黄色穆子的 Mg 含量差异极显著。Mg 对人体骨骼形成有重要作用, 并有助于 Ca 的吸收和利用, 以及蛋白质代谢。穆子 Ca、Mg 的利用效率可从 Ca、Mg 的高效吸收和高效利用两方面生理机制展开进一步研究。除此之外, 黑红色穆子的平均 K 和 Fe 含量也都最高, 分别为 583.4 和 2.9 mg/100 g。糙米中 K、Mg、Fe 含量分别为 268.0、143.0、1.8 mg/100 g^[29]。相比我们的主食大米, 黑红色穆子的矿物质相当丰富, 特别是 C34, 其 Mg、K、Ca、Fe 含量分别为 167.0、674.0、270.7 和 3.3 mg/100 g。此外, 其总淀粉、蛋白质和膳食纤维含量也较高, 分别为 71.7、6.7 和 11.5 g/100 g, 可作为穆子品质育种的亲本材料。

有研究^[1,5]表明, 穆子膳食纤维和抗氧化活性物质相当丰富, 本研究发现不同粒色的穆子膳食纤维没有显著差异, 范围为 9.8~13.0 g/100 g。相比国外

报道的印度穆子膳食纤维含量 1.4%~11.5%^[30-31]以及国内报道的贵州穆子膳食纤维含量为 2.6%^[32]和广西穆子的 2.5 g/100 g^[33], 本研究中的穆子资源膳食纤维含量普遍较高。深色种皮的杂粮一般抗氧化活性物质较高。如黑高粱中总多酚含量最高, 是白色和双色高粱的 2 倍^[34]。深色小米(绿小米和黑小米)原花青素含量显著高于其他米色小米^[35]。黑色荞麦的维生素 E 和烟酸比棕色荞麦高^[36]。深色穆子种皮酚类物质更丰富, 如白色穆子含 0.04%~0.09% 的多酚, 棕色品种含多酚 0.1%~3.5%^[37]。但本研究发现粒色与总黄酮含量关系不大, 范围为 159.0~201.0 mg/100 g。前人^[38]研究发现, 穆子中黄酮类化合物含量丰富, 高达 210.0 mg/100 g。本研究中黑红色穆子(C69)总黄酮含量最高, 为 201.0 mg/100 g。

本研究相关性分析表明, L^* 值与总糖、钙含量呈极显著负相关关系, 相关系数分别为-0.323 和 -0.339, 与镁含量呈显著负相关关系, 相关系数为-0.304。 a^* 值与营养指标之间没有显著关系。 b^* 值与镁含量呈极显著负相关关系, 相关系数为-0.322, 与总淀粉和钙含量呈显著负相关关系, 相关系数分别为-0.261 和-0.273。总体看, 粒色与总糖、钙和镁含量相关性比较大。因此, 可通过穆子粒色初步筛选出高糖、高钙或高镁穆子资源, 为穆子品质育种提供理论依据, 提高育种效率。

4 结论

穆子粒色主要与钙和镁含量相关, 明度和黄度越低, 钙和镁含量越高。黑红色穆子营养成分突出, 其矿物质中镁、钾、钙、铁含量均较其他粒色穆子高, 总糖、蛋白质、膳食纤维、VB₁、VB₂和总黄酮类与其他粒色穆子没有显著差异。黑红色穆子 C34 可作为品质育种的优异亲本材料。

参考文献

- [1] 王双辉, 陈致印, 谢晶, 等. 穆子营养成分及功能利用研究进展. 食品工业科技, 2017, 38(13): 329-334.
- [2] Feng L Y, Gao L Z. Characterization of chloroplast genome of *Eleusine coracana*, a highly adaptable cereal crop with high nutritional reputation. Mitochondrial DNA Part B-Resources, 2021, 6(10): 2816-2818.
- [3] Chandra D, Chandra S, Pallavi, et al. Review of Finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn): A power house of health benefiting nutrients. Food Science and Human Wellness, 2016, 5(3): 149-155.
- [4] Kumar A, Metwal M, Kaur S, et al. Nutraceutical value of finger millet [*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.], and their improvement using omics approaches. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 934.
- [5] Ramesh V, Mathur M S, Vasist K, et al. Nutraceutical potential of finger millet (*Eleusine Coracana*): review. Journal of Pathology Research Reviews & Reports, 2020: 2(1): 1-5.
- [6] Rathore T, Singh R, Kamble D B, et al. Review on finger millet: Processing and value addition. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2019, 8(4): 283-291.
- [7] Shobana S, Krishnaswamy K, Sudha V, et al. Finger millet (Ragi, *Eleusine coracana* L.): a review of its nutritional properties, processing, and plausible health benefits. Advances in Food and Nutrition Research, 2013, 69: 1-39.
- [8] 张帅, 吴昆仑, 姚晓华, 等. 不同粒色青稞营养品质与抗氧化活性物质差异性分析. 青海大学学报, 2017, 35(2): 19-27.
- [9] 柳家荣, 郑永战, 徐如强. 芝麻种质营养品质研究. 华北农学报, 1992(3): 110-116.
- [10] 赵萌萌, 杨希娟, 党斌, 等. 不同粒色藜麦营养品质及多酚组成与抗氧化活性比较分析. 食品与机械, 2020, 36(8): 29-35.
- [11] Govindaraj M, Rao A S, Shivade H, et al. Effect of grain colour on iron and zinc density in pearl millet. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2018, 78(2): 247-251.
- [12] 何继红, 杨天育, 吴国忠. 甘肃省谷子地方品种营养品质的分析与评价. 植物遗传资源科学, 2000, 3(1): 41-44.
- [13] 赵利, 王斌, 苗红梅, 等. 胡麻种质资源籽粒表型与品质性状评价及其相关性研究. 植物遗传资源学报, 2020, 21(1): 243-251.
- [14] Vadivoo A S, Joseph R, Ganesan N M. Genetic variability and diversity for protein and calcium contents in finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn) in relation to grain color. Plant Foods for Human Nutrition, 1998, 52(4): 353-364.
- [15] 李基光, 王艳兰, 向兰舟, 等. 69 份穆子地方种质资源表型多样性评价. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1509-1520.
- [16] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中还原糖的测定: GB 5009.7-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定: GB 5009.88-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 国家标准化管理委员会. 食品中氨基酸的测定: GB 5009.124-2003. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [21] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中镁的测定: GB 5009.241-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定: GB 5009.91-2017. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 国家标准化管理委员会. 食品中钙的测定: GB 5009.92-2003. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [24] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中铁的测定: GB 5009.90-2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [25] 欧阳屹南, 刘洋, 彭佳师, 等. 苦荞 *FtFLS1* 基因的功能和遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(5): 1401-1412.
- [26] 郝志. 小麦籽粒主要有益矿质元素的含量及其 QTL 定位. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- [27] 李爽, 时学双, 张小村, 等. 大麦籽粒矿质元素含量分析与评价. 大麦与谷类科学, 2022, 39(4): 1-7.
- [28] Puranik S, Kam J, Sahu P P, et al. Harnessing finger millet to combat calcium deficiency in humans: challenges and prospects. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1311.
- [29] Rachie K O, Peters L R V. The Eleusines: a review of the world

- literature. Patancheru, Andhra Pradesh, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1977: 118-136.
- [30] Gopalan C, Ramashastry B V, Balasubramaniam S C. Nutritive value of Indian foods. Indian Council of Medical Research, 2009: 59-67.
- [31] Wankhede D B, Shehnaj A, Rao M R R. Carbohydrate composition of finger millet (*Eleusine coracana*) and foxtail millet (*Setaria italica*). Plant Foods for Human Nutrition, 1979, 28: 293-303.
- [32] 徐本刚, 苏伟. 红稗的营养成分分析. 贵州农业科学, 2010, 38(9): 76-77.
- [33] 卢福芝, 李启虔, 黄芳, 等. 广西产鸭脚粟米营养成分的测定及分析. 粮食与饲料工业, 2016(3): 40-42.
- [34] Boncompagni E, Nielsen E, Sanogo M D, et al. Anti-nutritional metabolites in six traditional African cereals. Journal of Food and Nutrition Research, 2019, 58(2): 115-124.
- [35] 赵欣, 梁克红, 朱宏, 等. 不同米色小米营养品质与蒸煮特性研究. 食品工业科技, 2020, 41(24): 298-303.
- [36] 杨克理. 普通荞麦粒色与品质关系初探. 内蒙古农业科技, 1993(6): 25-27.
- [37] Chethan S, Malleshi N G. Finger millet polyphenols: Optimization of extraction and the effect of pH on their stability. Food Chemistry, 2007, 105(2): 862-870.
- [38] Shahidi F, Chandrasekara A. Millet grain phenolics and their role in disease risk reduction and health promotion: A review. Journal of Functional Foods, 2013, 5(2): 570-581.

Preliminary Study on the Relationship between Nutritional Quality and Grain Color of 69 Domestic Finger Millet Resources

Hu Liqin¹, Wang Suhua¹, Zhang Lu¹, Yang Xuelei¹, He Luqiu¹, Tang Rui², Li Jiguang¹

¹Hunan Crop Research Institute, Changsha 410125, Hunan, China;

²Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, Hunan, China)

Abstract In this study, 12 nutritional indexes such as grain color (brightness: L^* , red: a^* , yellow: b^*), starch and total flavone contents of 69 finger millets resources were determined, and the differences of nutritional indexes of grain color and the correlation between grain color and nutritional indexes were analyzed according to L^* , a^* and b^* values. The results showed that the cluster analysis of 69 finger millet resources were separated into three groups: brown-yellow, brownness, and black-red. The average contents of protein, total amino acid, calcium, iron, potassium, magnesium, and VB₂ of black red finger millets were higher than those of all other colors, and the magnesium content was significantly different from that of the other two kinds of grain colors ($P < 0.01$). The correlation results exhibited that both calcium and magnesium contents were negatively correlated with L^* and b^* ($P < 0.01$). The lower the L^* and b^* values, the higher the content of Ca and Mg. Total glucose was negatively correlated with L^* value ($P < 0.01$), total starch content was negatively correlated with b^* value ($P < 0.05$), and the rest were not correlated with grain color value.

Key words Finger millet; Grain color; Nutritional index; Flavonoid content