潘怡敏,阳世杰,黄蕊,等.山西谷子地方品种的品质分析与综合质量评估[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(4):16-26.
Pan Y M, Yang S J, Huang R, et al. Quality analysis and comprehensive quality evaluation of foxtail millet landraces in Shanxi [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(4):16-26.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202504024

山西谷子地方品种的品质分析与综合质量评估

潘怡敏,阳世杰,黄蕊,侯森,王海岗*

(山西农业大学 农学院/农业基因资源研究中心,山西 太原 030031)

摘　要:[目的]谷子是重要的杂粮作物,具有耐瘠薄、耐干旱、生育期短等特点。谷子籽粒脱壳后俗称小米,富含蛋白质、脂肪、糖类、膳食纤维以及丰富的人体所必需的微量元素,营养价值极高。随着公众对健康品质的意识逐渐提高,筛选出具有高品质的谷子品种变得至关重要。谷子的品质由外观品质、蒸煮食味品质、营养品质等方面的评价指标决定,但对大量地方品种进行全面的品质分析与综合质量评估的报道较少,限制了高品质谷子的筛选与育种。[方法]从山西省各种植区域挑选312份谷子地方品种进行品质分析,测定4个外观品质指标、7个蒸煮品质指标、3个营养品质指标后,采用遗传多样性分析、相关性分析、主成分分析的多元统计分析计算不同谷子品种3类品质的综合得分并进行综合质量评估。[结果]遗传多样性指数结果表明,所有品质指标指数均大于1.00,依次为淀粉含量>低谷黏度>崩解值>峰值黏度>最终黏度>蛋白质含量>回升值>L^*>糊化温度>黄色素含量>CCI>糊化时间>a^*>b^*,表明不同谷子地方品种相关品质性状的遗传变异丰富。相关性分析表明,山西地区312份谷子品种的淀粉含量和黄色素含量越高,其外观品质中的米色越黄、蒸煮品质中的糊化特性越高,适口性越好,进一步表明谷子的外观品质、蒸煮品质、营养品质间关系密切。主成分分析将14个指标降维生成6个主成分,累计贡献率达到85.12%,能够基本涵盖地方品种中品质指标的信息。长治市沁源县的小红谷得分排名第1。[结论]312份谷子品种14个品质指标综合评估表明,来自沁源的小红谷品质最高,后期可作为培育优质谷子品种的亲本材料。

关键词:谷子; 地方品种; 品质分析; 综合质量评估
中图分类号:S515　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)04-0016-11

Quality analysis and comprehensive quality evaluation of foxtail millet landraces in Shanxi

Pan Yimin, Yang Shijie, Huang Rui, Hou Sen, Wang Haigang*

(*College of Agronomy/Agricultural Genetic Resources Research Center, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China*)

Abstract: [Objective] Foxtail millet is an important coarse cereal crop, characterized by its tolerance to poor soils, drought resistance, and short growth period. The dehulled grains, commonly known as millet, are rich in protein, fat, carbohydrates, dietary fiber, and essential trace elements, offering high nutritional value. With increasing public awareness of health and quality, screening high-quality foxtail millet varieties has become crucial. The quality of foxtail millet is determined by evaluation indexes such as appearance, cooking flavor quality, and nutritional quality. However, comprehensive quality analysis and integrated quality assessment of a large number of local varieties remain limited, restricting the screening and breeding of high-quality foxtail millet. [Methods] A total of 312 foxtail millet landraces from various growing regions in Shanxi Province were selected for quality analysis. Four appearance quality indexes, seven cooking flavor quality indexes, and three nutritional quality indexes were measured. Multivariate statistical analyses including genetic diversity analysis, correlation analysis, and principal compo-

收稿日期:2025-04-13　　**修回日期**:2025-06-10
基金项目:山西农业大学博士科研启动项目(2021BQ37);科技重大专项计划"揭榜挂帅"项目(202101140601027);山西省农业关键核心技术攻关子课题(NYGG19-2-3)
作者简介:潘怡敏(ORCID:0009-0007-7553-5586),硕士研究生,研究方向:种质创新与遗传工程,E-mail:1654067255@qq.com
*通信作者:王海岗(ORCID:0009-0005-1731-8669),研究员,硕士生导师,E-mail:nkywhg@126.com

nent analysis were conducted to calculate comprehensive scores for the three quality categories and perform an integrated quality assessment. [Results] The genetic diversity index showed that all quality indexes were greater than 1.00, ranked as follows: starch content>trough viscosity>disintegration value>peak viscosity>final viscosity>protein content>recovery value>L^*>pasting temperature>yellow pigment content>CCI>pasting time>a^* value>b^* value, indicating rich genetic variation in quality-related traits among the different landraces. Correlation analysis revealed that higher starch and yellow pigment content in the 312 foxtail millet varieties were associated with yellower grain color (appearance quality), better gelatinization properties (cooking quality), and improved palatability, further demonstrating a close relationship among appearance, cooking, and nutritional quality. Principal component analysis reduced the 14 indicators to six principal components, with a cumulative contribution rate of 85.12%, effectively capturing the quality-related information of the landraces. "Little Red Valley" (Xiaohonggu) from Qinyuan County, Changzhi City, ranked first in the comprehensive evaluation. [Conclusion] The integrated assessment of 14 quality indexes across 312 foxtail millet varieties indicated that "Little Red Valley" from Qinyuan exhibited the highest quality and could be used as parental material for breeding superior foxtail millet varieties in future studies.

Keywords: Grain, Landraces, Quality analysis, Comprehensive quality assessment

谷子是世界上最古老的驯化作物之一,也是中华农耕文明形成的主体作物,主要种植在干旱和半干旱地区,是一种营养价值极高的杂粮作物[1]。谷子籽粒脱壳后俗称小米,富含蛋白质、脂肪、糖类、膳食纤维以及丰富的人体所必需的微量元素[2-4]。随着近年来对气候环境变化、农业可持续性和粮食安全的重视,谷子耐干旱、耐瘠薄、C4高光效、环境适应性强和养分利用效率高等显著特征引起越来越多的关注,被认为是应对未来复杂气候环境的重要战略储备作物[5-6],目前也正在快速发展成为C4光合作用及禾本科黍亚科功能基因研究的模式植物[7-8]。

谷子品质是一个复杂的综合性状,它由一系列品质评价指标决定,主要包括外观品质、蒸煮品质、营养品质等[9]。外观品质是公众选购小米首要关注的性状,米色是评价谷子外观品质的重要指标之一,能够直观反映小米品质的优劣[10]。蒸煮品质是一个综合性状,是由众多淀粉合成相关基因共同控制的复杂调控网络,通常以小米饭或小米粥中淀粉的糊化特性等指标来判断[11-12]。快速黏度分析(Rapid Visco Analyser,RVA)可作为谷子蒸煮品质评价的一项重要的辅助选择技术,RVA特征值中崩解值越大、消减值越小,米饭适口性越好[13]。谷子营养品质的研究主要涉及蛋白质、氨基酸、脂肪、矿物质、维生素、黄色素的含量等[14-15]。黄色素是谷子籽粒中的天然色素,是小米的重要营养成分,其主要组分含有叶黄素、玉米黄质以及少量的隐黄质和β-胡萝卜素等类胡萝卜素[16-18],食用后可在人体肝脏内转化成维生素A,具有保护视觉与上皮组织以及提高机体免疫力等重要生理功能[19-20]。

山西是中华农耕文明的重要发源地,是谷子驯化和栽培中心。山西谷子种植区划分为春播早熟区、春播中熟区、春播晚熟区和夏播区,复杂多样的地理生态类型孕育了丰富多样的谷子种质资源[21]。山西省种质库保存了6000多份各个种植区域的地方品种,这些地方品种是经过长期的地理生态环境选择和人工驯化形成的可识别名称、无遗传改良、高遗传多样性、地域适应性好、抗逆性强的谷子种质资源,也是十分重要的育种材料[22]。然而,目前尚缺乏对山西省内各个种植区域地方品种全面的品质分析,也没有建立起品质方面的综合质量评估系统。因此,本研究从山西省各个种植区域中筛选出312份地方品种,对表征外观品质、蒸煮品质和营养品质的14个指标进行检测分析,并通过遗传多样性分析、相关性分析和主成分分析进行综合品质质量评估,旨在为筛选出高品质谷子种质资源及后期品质育种提供科学依据。

1　材料和方法

1.1　试验材料

试验材料为山西省不同种植区域的312份谷子地方品种,均来源于国家特色杂粮作物种质资源中期库(太原),详细信息见表1。

1.2　试验设计

试验于山西农业大学农业基因资源研究中心东阳试验示范基地(37°33′21" N, 112°40′2" E)进行,分别于2020年5-9月和2022年5-9月种植312份山西谷子地方品种,2次种植期间的气象条件见图1。试验地海拔802 m,年平均气温为9.7 ℃,年

平均降水量为440.7 mm,年平均风速为2.3 m/s,最少日照数为253.5 h。试验地为褐土类土壤,盐度为7.1,土壤肥力中等,地势平坦。每个地方品种栽种2行,行长2.5 m,行距0.4 m,5月中旬播种,9月中旬收获。田间施用140 kg/hm^{2}优质复合肥(N:P_2O_5:K_2O=2:1:2)。谷子整个生长期不进行灌溉,病虫害防控管理到位,在苗期、拔节期和孕穗期进行常规田间人工除草。

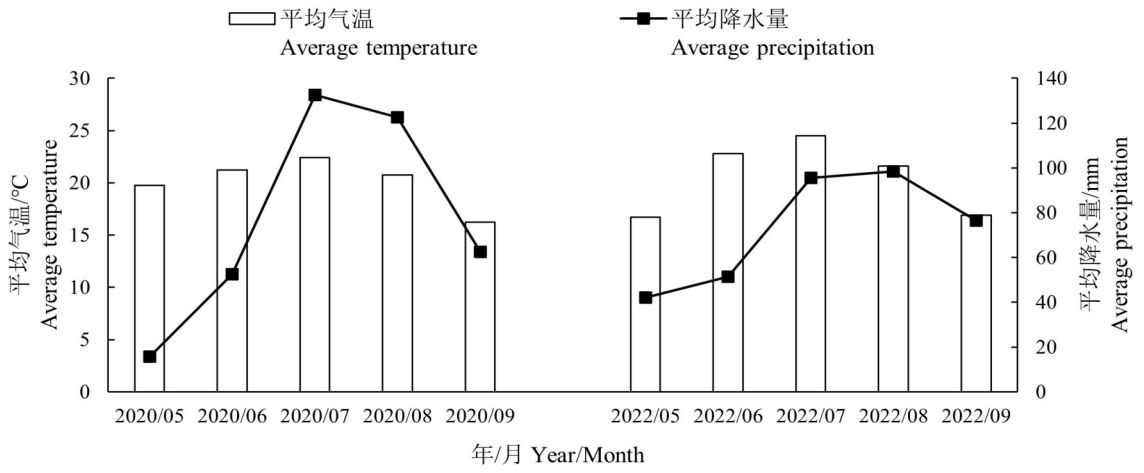


图1 试验地种植期间的气象条件

Fig.1 Meteorological conditions during planting at the test site

表1 312份山西谷子地方品种的来源信息及综合评估得分排名

Table 1 Source information and comprehensive assessment score ranking of 312 foxtail millet landraces from Shanxi

排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source	排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source	排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source
1	小红谷	长治市沁源县	22	爪爪谷	运城市夏县	43	九格楞	晋中市昔阳县
2	红谷	吕梁市石楼县	23	绳绳谷	晋中市平遥县	44	黄沙谷	长治市长子县
3	铁卜罗	忻州市定襄县	24	高杆黄	运城市垣曲县	45	人人爱	晋中市灵石县
4	小红谷	长治市屯留区	25	一丈黄	晋中市和顺县	46	白流沙谷	长治市长子县
5	小红谷	吕梁市汾阳市	26	白爪谷	长治市沁县	47	代州谷	吕梁市临县
6	老来白谷	晋中市左权县	27	酒谷	临汾市侯马市	48	小灰谷	长治市黎城县
7	麦种长	长治市平顺县	28	毛尖谷	太原市阳曲县	49	白流沙	晋中市平遥县
8	小白谷	晋中市祁县	29	白苗黄谷	晋中市左权县	50	河南糙	长治市壶关县
9	红杆毛谷	临汾市浮山县	30	大毛谷	临汾市尧都区	51	白流沙	晋中市左权县
10	野生谷	大同市天镇县	31	早春谷	长治市平顺县	52	紫杆黄	长治市壶关县
11	晋谷21号	吕梁市汾阳市	32	紫杆黄	长治市襄垣县	53	打锣锤	吕梁市中阳县
12	各谷	晋中市平遥县	33	特早3号	吕梁市汾阳市	54	三变化	大同市广灵县
13	长毛大黄谷	临汾市浮山县	34	三变化	太原市阳曲县	55	紫杆谷	大同市南郊区
14	红谷子	忻州市岢岚县	35	谷子	运城市夏县	56	八一一谷	吕梁市临县
15	红谷	晋中市左权县	36	老来白	晋中市左权县	57	洋谷	运城市平陆县
16	小白流沙	晋中市灵石县	37	紫杆良	长治市黎城县	58	小红谷	大同市浑源县
17	猪咀谷	阳泉市盂县	38	毛毛谷	晋中市平遥县	59	三根齐毛谷	晋中市榆次区
18	九杆旗	吕梁市孝义市	39	优质34号	吕梁市汾阳市	60	老一条红	长治市平顺县
19	白流沙	吕梁市方山县	40	猫尾巴谷	临汾市吉县	61	黑选1号	太原市小店区
20	糙黄谷	长治市潞城区	41	露米黄	晋中市介休市	62	小白米谷	长治市平顺县
21	知州谷	吕梁市中阳县	42	大对着谷	吕梁市交城县	63	紫根黄	太原市阳曲县

续表

排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source	排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source	排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source
64	东和谷	阳泉市平定县	109	金点鱼	忻州市繁峙县	154	白母鸡	晋中市太谷区
65	珠沙软谷	吕梁市临县	110	紫杆谷	大同市左云县	155	朱砂红谷	晋中市平遥县
66	软黑谷	长治市屯留区	111	大黄谷	吕梁市汾阳市	156	大白谷	朔州市平鲁区
67	谷子	晋中市太谷区	112	谷子	运城市夏县	157	九根青谷	晋城市高平市
68	小黄毛谷	晋中市灵石县	113	媳妇笑	晋中市昔阳县	158	毛谷	临汾市翼城县
69	红腿谷	大同市	114	小谷子	晋中市太谷区	159	小白谷	大同市广灵县
70	红小谷	吕梁市临县	115	触坡黄	大同市广灵县	160	红苗毛谷	晋中市和顺县
71	大头毛谷	临汾市大宁县	116	饿死牛	晋中市榆次区	161	小软谷	晋中市灵石县
72	平遥谷	吕梁市离石区	117	大同黄	晋中市寿阳县	162	大白谷	晋中市榆次区
73	猪粪谷	临汾市永和县	118	二黄谷	吕梁市汾阳市	163	豆花谷	太原市阳曲县
74	铁牛吼	阳泉市郊区	119	七十六谷	阳泉市平定县	164	智包粱柳	大同市广灵县
75	边区一号	晋城市高平市	120	大寨白	大同市灵丘县	165	三黄谷	晋中市祁县
76	秋露白	大同市广灵县	121	八升米	长治市长子县	166	玉皇谷	吕梁市离石区
77	铁乔谷	晋中市和顺县	122	临秋变	阳泉市盂县	167	铁巴其	晋中市榆社县
78	太一	太原市小店区	123	小盂县谷	晋中市和顺县	168	连谷	晋中市平遥县
79	小红谷	晋中市平遥县	124	红苗白谷	晋中市寿阳县	169	铁鞭杆谷	阳泉市郊区
80	红苗谷	晋中市榆次区	125	大毛谷	晋中市祁县	170	秋不死	晋中市平遥县
81	二白流沙	朔州市右玉县	126	寿阳黄	太原市阳曲县	171	金龙瓜巴色	大同市广灵县
82	刘沟谷	临汾市翼城县	127	繁峙谷	吕梁市岚县	172	紫杆谷	晋中市左权县
83	白流沙	太原市阳曲县	128	北京白谷	忻州市	173	大红袍	朔州市朔城区
84	平新谷	晋中市平遥县	129	一窝蛇	阳泉市盂县	174	母鸡嘴	晋中市左权县
85	香色谷	晋城市陵川县	130	红草谷	太原市阳曲县	175	红洒谷	临汾市安泽县
86	二虎尾	太原市清徐县	131	白谷	晋中市平遥县	176	大白谷	长治市潞城区
87	代州黄	晋中市介休市	132	齐头谷	忻州市偏关县	177	多穗谷	朔州市山阴县
88	黄谷	临汾市曲沃县	133	小谷子	长治市武乡县	178	马缰绳	运城市永济市
89	沁州黄	晋中市太谷区	134	七月黄	吕梁市岚县	179	压塌车	大同市
90	红腿山东谷	晋中市平遥县	135	白谷子	晋城市陵川县	180	小白谷	大同市新荣区
91	高杆白毛谷	晋中市介休市	136	三变丑	长治市武乡县	181	压塌车	忻州市繁峙县
92	毛黄谷	晋中市左权县	137	水白造	晋中市左权县	182	霸王鞭	大同市浑源县
93	长象白	长治市襄垣县	138	文水谷	晋中市平遥县	183	露米黄	晋中市平遥县
94	把子谷	临汾市乡宁县	139	小红谷	忻州市原平市	184	黑软谷	晋中市平遥县
95	紫根白	晋中市寿阳县	140	大黄谷	吕梁市方山县	185	海鸭腿	吕梁市兴县
96	黄毛谷	晋中市榆次区	141	石榴榴	晋中市寿阳县	186	媳妇糙	长治市平顺县
97	尺八量	晋中市祁县	142	黎城谷	长治市武乡县	187	黄单子谷	大同市
98	进军曲	大同市南郊区	143	小黄谷	晋中市昔阳县	188	川谷	晋中市左权县
99	黄软谷	忻州市神池县	144	牛毛黄	阳泉市郊区	189	小白流沙	吕梁市孝义市
100	伏尽糙	长治市平顺县	145	四杆旗	吕梁市孝义市	190	九根支	吕梁市汾阳市
101	赛头红	阳泉市盂县	146	大同15号	大同市云州区	191	大红黄谷	大同市广灵县
102	白秆草黄谷	晋中市平遥县	147	猫蹄软谷	长治市平顺县	192	黄谷	朔州市平鲁区
103	球沙硬谷	吕梁市临县	148	娥阳谷	吕梁市交城县	193	白软谷	长治市武乡县
104	白母鸡咀	长治市屯留区	149	二紫谷	朔州市山阴县	194	伏谷子	晋中市平遥县
105	小黄谷	长治市襄垣县	150	二白软谷	朔州市应县	195	软谷	太原市万柏林区
106	铁牛谷	晋中市榆次区	151	白谷子	晋城市陵川县	196	红软谷	长治市武乡县
107	鸡爪谷	运城市垣曲县	152	76谷	晋中市寿阳县	197	红花钻	长治市武乡县
108	大红袍	吕梁市汾阳市	153	大黄谷	晋中市左权县	198	尖嘴黄谷子	晋中市介休市

续表

排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source	排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source	排名 Ranking	品种名称 Landraces name	来源 Source
199	牛毛黄	太原市阳曲县	237	河不死	阳泉市盂县	275	酒谷	运城市永济市
200	晋谷21号	吕梁市汾阳市	238	辽东黄	大同市左云县	276	猫蹄谷	长治市壶关县
201	不断青	晋城市陵川县	239	紫秆谷	晋中市平遥县	277	白料角软谷	吕梁市石楼县
202	牛毛黄	太原市阳曲县	240	小黄谷	大同市天镇县	278	寸寸谷	太原市万柏林区
203	小砖灰	晋中市寿阳县	241	打锣锤软谷	晋中市介休市	279	龙爪黄	大同市阳高县
204	尺八量	临汾市乡宁县	242	东方亮	大同市	280	毛梁谷	朔州市山阴县
205	南脑谷	长治市襄垣县	243	毛尖谷	晋中市介休市	281	红苗毛谷	长治市平顺县
206	沁州黄	忻州市原平市	244	红杆谷	运城市盐湖区	282	蛇谷	太原市阳曲县
207	牛毛红	大同市阳高县	245	白苗蛇谷	晋中市寿阳县	283	油沙白	大同市灵丘县
208	黑临秋	晋中市左权县	246	晋谷6号	吕梁市汾阳市	284	红谷子	大同市天镇县
209	良谷	长治市黎城县	247	拖叶黄	忻州市原平市	285	黄沙谷	晋中市榆社县
210	山东红	大同市灵丘县	248	红龙爪粘谷	晋中市和顺县	286	黄软谷	忻州市繁峙县
211	白油谷	大同市	249	白毛糙	长治市壶关县	287	红石榴	阳泉市盂县
212	娥秩谷	长治市武乡县	250	秋不死	临汾市古县	288	红熟谷	吕梁市岚县
213	软谷	忻州市定襄县	251	铁条谷	晋中市左权县	289	灰良谷	吕梁市兴县
214	黄米糙	长治市沁县	252	黑大青谷	大同市阳高县	290	小白谷	大同市浑源县
215	白支安青	晋中市平遥县	253	气死牛	晋中市和顺县	291	蛇儿谷	晋中市太谷区
216	竹叶青	晋中市左权县	254	红流沙	太原市万柏林区	292	黄软谷	朔州市应县
217	六月黄	晋中市左权县	255	尖穗白谷	晋中市左权县	293	石榴谷	太原市清徐县
218	中对则	吕梁市临县	256	圪垛凹	临汾市古县	294	红金极	晋中市太谷区
219	毛白谷	朔州市山阴县	257	落菜鸡	忻州市偏关县	295	小软谷	晋城市陵川县
220	交谷	忻州市忻府区	258	猪屎谷	晋中市榆社县	296	黄糕谷	大同市阳高县
221	小白谷	大同市灵丘县	259	向阳谷	吕梁市中阳县	297	狼尾巴粘谷	大同市广灵县
222	特早7号	吕梁市汾阳市	260	压塌车	忻州市定襄县	298	猪汉肠软谷	吕梁市离石区
223	白谷子	大同市阳高县	261	大同红谷	大同市广灵县	299	黑软谷	晋中市灵石县
224	砖灰谷	晋中市寿阳县	262	一拳三	晋中市昔阳县	300	紫秆软谷	晋中市介休市
225	谷龙爪粘谷	大同市广灵县	263	小黄谷	大同市	301	海福混	忻州市定襄县
226	鞭杆黄	长治市平顺县	264	红苗石榴谷	阳泉市平定县	302	青软谷	朔州市山阴县
227	压塌车	晋中市左权县	265	母老鼠	阳泉市平定县	303	青米谷	临汾市安泽县
228	禾谷子	运城市万荣县	266	齐头黄	忻州市河曲县	304	大青谷	晋中市寿阳县
229	一条红	长治市潞城区	267	软谷	晋中市昔阳县	305	兔嘴粘谷	大同市灵丘县
230	谷子	朔州市右玉县	268	大凉谷	大同市广灵县	306	青谷	长治市屯留区
231	红杆线谷	吕梁市兴县	269	黄软谷	运城市平陆县	307	垅谷	朔州市应县
232	一拳三	晋中市昔阳县	270	小白谷	长治市长子县	308	黑谷	忻州市原平市
233	白苗粘谷	阳泉市盂县	271	大金股	忻州市静乐县	309	青谷	临汾市蒲县
234	圪了腰	晋中市和顺县	272	翟老婆1	晋中市和顺县	310	黄软谷	大同市南郊区
235	小红谷	临汾市曲沃县	273	大白软谷	忻州市五台县	311	青达谷	吕梁市石楼县
236	丫丫贴黄	晋中市寿阳县	274	黄谷	运城市平陆县	312	青谷子	大同市天镇县

1.3 试验方法

1.3.1 外观品质测定

将成熟谷子收获脱壳后得到小米,使用光栅分光测色仪(YS3010,深圳市三恩时科技有限公司)进行米色L^*、a^*、b^*、CCI指数测定,其中L^*表示亮度,L^*值越大,亮度越高;a^*表示红绿度,a^*值越大,米色越红;b^*表示黄蓝度,b^*值越大,米色越黄;CCI正值表示红色,负值表示蓝绿色,为0时则表示红、黄、蓝绿色的混合色。CCI值作为米色测定的综合指标,表现出明显的品种间差异,整体趋势为黄色最高,绿色次之,白色最低,可对不同品种米色性状进行鉴定。上述指标每品种重复3次。

1.3.2　蒸煮品质测定

使用快速黏度分析仪(Rapid Visco Analyser V3.2,Perten Instruments,澳大利亚)测定小米蒸煮品质。RVA谱中可以得到的一级参数有峰值黏度(Peak viscosity,PKV)、低谷黏度(Hot vscosity,HPV)、最终黏度(Cool viscosity,CPV)、糊化时间(Peak time,PeT)、糊化温度(Pasting temperature,PaT),上述指标每品种重复3次。由一级参数计算所得的崩解值(Breakdown viscosity,BDV)、回生值(Consistency,CSV)的计算公式如下:

崩解值=峰值黏度－低谷黏度

回生值=最终黏度－低谷黏度

式中,黏度值以cP(Centipoise)为单位[23]。

1.3.3　营养品质测定

用近红外分析仪(NIRSTMDS2500,福斯分析仪器公司,丹麦)测定小米蛋白质含量、淀粉含量。小米黄色素含量的测定按照笔者之前的试验方法进行处理[19]。上述指标每品种重复3次。

1.4　统计分析

计算谷子品种中不同品质指标的算数平均数(X)和标准差(S)后,根据计算结果将所有品种分为10级,按第1级[$X_i<(X-2S)$]到第10级[$X_i>(X+2S)$]排列,每0.5S为1级,X_i为第i级中的品种数量。遗传多样性指数即Shannon－Weiner index(H')的计算公式如下:

$$H'=-\sum_{i=1}^{n}P_i\times\ln(P_i)\ (i=1,2,3\cdots,n)$$

式中,P_i为某性状第i级别内品种数占总数的百分比;n为本研究中谷子品种等级,n=10。

利用Excel 2016和SPSS 26软件对测量数据进行整理和分析,利用Origin 2024和Adobe Illustrator 2024软件作图。

2　结果与分析

2.1　山西地区谷子地方品种的遗传多样性分析

由表2可见,米色综合指标L^*、a^*、b^*、CCI的变异系数为4.62%～15.35%,平均为11.25%,其中大于10%的指标有3个,依次为a^*>CCI>b^*。CCI的变异系数为13.95%,表明山西省312份谷子地方品种的外观品质存在较大差异。结合RVA各特征值参数进行分析,蒸煮品质指标变异系数为3.08%～42.32%,平均为25.15%,由大到小依次为崩解值>回升值>低谷黏度>最终黏度>峰值黏度>糊化时间>糊化温度。其中,崩解值的遗传变异最大,高达42.32%,品种间回升值、低谷黏度、最终黏度、峰值黏度的变异程度也较大,分别为33.42%、30.93%、29.93%、26.58%。糊化时间和糊化温度的变异程度较小,分别为9.80%、3.08%。说明不同地方品种间蒸煮品质也存在较大差异。3种营养成分含量的变异系数为2.03%～26.80%,平均为12.2%,由大到小依次为黄色素含量>蛋白质含量>淀粉含量。说明山西省312份地方品种营养成分差异较大,其中黄色素含量的变异程度最大。遗传多样性指数结果分析表明,所有品质指标遗传多样性指数均大于1.00,由大到小依次为淀粉含量>低谷黏度>崩解值>峰值黏度>最终黏度>蛋白质含量>回升值>L^*>糊化温度>黄色素含量>CCI>糊化时间>a^*>b^*,其中淀粉含量的遗传多样性指数最大,而米色相关指标较小。遗传多样性指数结果表明312份谷子地方品种品质存在着较大的遗传变异,这是筛选优质谷子资源的重要基础。

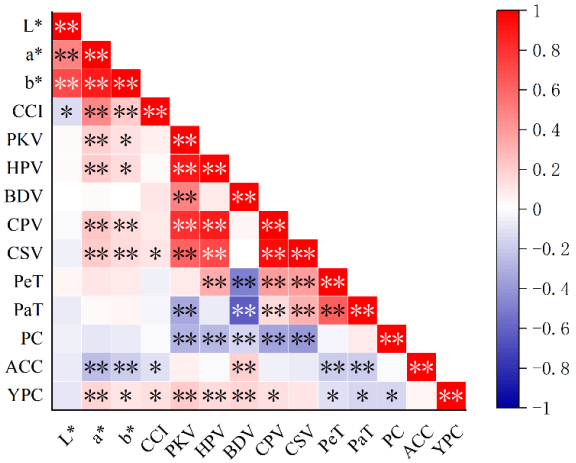
2.2　山西地区谷子地方品种品质指标相关分析

为进一步探究地方品种间不同品质指标的关联程度,对312份谷子品种进行相关性分析(图2)。结果显示,外观品质中,b^*与L^*、a^*、CCI、最终黏度、回升值为极显著正相关,与峰值黏度、低谷黏度、黄色素含量为正相关,而与淀粉含量负相关。这说明b^*值越大,米色越黄,其淀粉糊化特性特征值和黄色素含量越高,淀粉含量越低。蒸煮品质中,糊化特性可以用崩解值有效判断小米的适口性。崩解值与峰值黏度、淀粉含量、黄色素含量存在极显著正相关,与蛋白质含量、糊化时间、糊化温度存在极显著负相关,说明RVA特征值中崩解值越大,淀粉含量和黄色素含量越高,适口性越好。营养品质中,蛋白质含量与峰值黏度、低谷黏度、崩解值、最终黏度、回升值存在极显著负相关,与黄色素含量存在负相关,说明蛋白质含量越高,蒸煮品质越差,同时与外观品质没有直接关系。淀粉含量与崩解值存在极显著正相关,与a^*、b^*、糊化时间、糊化温度存在极显著负相关,与CCI存在负相

表2 山西谷子品种数量性状的统计情况

Table 2 Statistics analysis of quantitative traits in Shanxi foxtail millet varieties

品质 Quality	性状 Traits	平均值±标准差 Mean±SD	变幅 Range	变异系数 CV	多样性指数 H'	H'排名 H' ranking
外观品质 Appearance quality	L^*	65.99±3.05	52.84～73.24	4.62%	1.860	8
	a^*	5.48±0.84	1.02～7.01	15.35%	1.721	13
	b^*	24.81±2.74	7.85～29.56	11.06%	1.640	14
	CCI	9.85±1.37	2.45～12.68	13.95%	1.792	11
蒸煮品质 Edible quality	峰值黏度/cP	974.29±258.92	124.00～1 534.00	26.58%	2.030	4
	低谷黏度/cP	724.26±224.01	88.00～1 192.00	30.93%	2.064	2
	崩解值/cP	250.03±105.81	10.00～563.00	42.32%	2.040	3
	最终黏度/cP	1 601.28±479.28	217.00～2 497.00	29.93%	2.008	5
	回生值/cP	877.02±293.11	84.00～1 404.00	33.42%	1.911	7
	糊化时间/min	5.30±0.52	4.07～7.00	9.80%	1.774	12
	糊化温度/℃	81.41±2.51	76.65～92.80	3.08%	1.853	9
营养品质 Nutritional quality	蛋白质含量/%	11.97±0.93	10.02～15.72	7.77%	1.997	6
	淀粉含量/%	7.42±0.15	6.96～7.87	2.03%	2.065	1
	黄色素含量/(μg/g)	24.70±6.62	3.39～43.94	26.80%	1.850	10



PKV:峰值粘度;HPV:低谷黏度;BDV:崩解值;CPV:最终黏度;CSV:回生值;PeT:糊化时间;PaT:糊化温度;PC:蛋白质含量;ACC:淀粉含量;YPC:黄色素含量。*表示显著相关($P\leqslant0.05$),**表示极显著相关($P\leqslant0.01$)。表3同

PKV: Peak viscosity ;HPV: Hot viscosity; BDV: Breakdown viscosity; CPV: Cool viscosity; CSV: consistency; PeT: Peak time; PaT: Pasting temperature; PC: Protein contents; ACC: Amylose contents; YPC: Yellow pigment contents. * indicates significant correlation ($P\leqslant0.05$), ** indicates highly significant correlation ($P\leqslant0.01$). The same as Table 3

图2 山西谷子地方品种14个品质指标的相关性

Fig.2 Correlation analysis of 14 quality indicators in Shanxi foxtail millet landraces

关。黄色素含量与a^*、峰值黏度、低谷黏度、崩解值存在极显著正相关,与b^*、CCI、最终黏度存在正相关,与糊化时间、糊化温度、蛋白质含量存在负相关。上述结果表明,山西地区312份谷子品种的淀粉含量和黄色素含量越高,其外观品质中的米色越黄,蒸煮品质中的糊化特性越高,小米的适口性越好。

2.3 山西地区谷子地方品种品质指标主成分分析

对14个品质指标进行降维,分为6个主成分,累计贡献率达到85.12%,能够基本涵盖各个地方品种的品质指标信息。因此,可通过主成分分析对不同谷子种质资源的品质进行综合评价(表3)。结果显示,第Ⅰ主成分和第Ⅱ主成分的贡献率分别为28.56%和18.08%,主要与蒸煮品质中的淀粉糊化特性有关。第Ⅲ主成分和第Ⅳ主成分的贡献率分别为16.83%和9.02%,其中特征向量绝对值较大的是L^*、a^*、b^*、CCI,主要与外观品质中的米色有关。第Ⅴ主成分和第Ⅵ主成分的贡献率分别为6.57%和6.07%,主要与外观品质中的米色、营养品质中的黄色素以及蒸煮品质中的糊化时间有关。主成分分析结果说明,优质育种对种质资源的筛选要重视蒸煮品质中的淀粉糊化特性和峰值时间及外观品质中的米色等性状。

2.4 山西地区谷子地方品种综合质量评估

基于主成分分析,计算综合主成分模型,得出主成分特征值之和(F),之后结合不同谷子地方品种的综合得分进行排名(表1),得分越高,说明该品种的综合品质越好[24]。结果显示,排名第1为长治市沁源县的小红谷。种植在吕梁市汾阳市的晋

表3　不同谷子地方品种品质指标的主成分分析

Table 3　Principal component analysis of quality indices of different foxtail millet landraces

项目 Projects	主成分 Principal components					
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
CPV (X_1)	0.942	0.006	−0.289	−0.017	0.047	0.023
HPV (X_2)	0.889	−0.132	−0.223	−0.110	0.177	0.085
CSV (X_3)	0.857	0.110	−0.300	0.056	−0.057	−0.026
PKV (X_4)	0.839	−0.446	−0.085	−0.100	0.212	0.034
PC (X_5)	−0.426	0.190	0.046	0.070	0.018	0.075
PaT (X_6)	0.055	0.822	−0.333	0.111	−0.052	0.096
BDV (X_7)	0.152	−0.794	0.263	−0.009	0.026	0.108
PeT (X_8)	0.376	0.681	−0.335	−0.078	−0.586	0.311
ACC (X_9)	−0.104	−0.428	−0.161	−0.255	0.208	0.028
b^*(X_{10})	0.407	0.324	0.801	−0.129	−0.061	0.013
a^*(X_{11})	0.481	0.284	0.760	0.169	0.139	−0.095
L^*(X_{12})	0.169	0.238	0.672	−0.589	−0.146	0.105
CCI(X_{13})	0.199	0.012	0.338	0.771	−0.204	0.650
YPC (X_{14})	0.233	−0.270	0.145	0.403	0.601	0.523
特征值 E	3.998	2.531	2.356	1.262	0.920	0.850
贡献率/% CR	28.555	18.080	16.830	9.018	6.570	6.069
累计贡献率/% CCR	28.555	46.635	63.465	72.483	79.053	85.122

谷21号谷子品种是山西省农业科学院经济作物研究所选育的名优谷子品种[25]。但在本次试验中,其综合得分的排名为200,这可能是受生态因子和地理环境的影响所致[26]。本试验中,长治市沁源县的小红谷综合品质得分排名第1,表现优异,可作为后续培育优质谷子品种的优异资源。

F_1=0.471X_1+0.445X_2+0.429X_3+0.420X_4−0.213X_5+0.028X_6+0.076X_7+0.188X_8−0.052X_9+0.204X_{10}+0.241X_{11}+0.085X_{12}+0.100X_{13}+0.117X_{14}

F_2=0.004X_1−0.083X_2+0.069X_3−0.280X_4+0.119X_5+0.517X_6−0.499X_7+0.428X_8−0.269X_9+0.204X_{10}+0.179X_{11}+0.150X_{12}+0.008X_{13}−0.170X_{14}

F_3=−0.188X_1−0.145X_2−0.195X_3−0.055X_4+0.030X_5−0.217X_6+0.171X_7−0.218X_8−0.105X_9+0.522X_{10}+0.495X_{11}+0.438X_{12}+0.220X_{13}+0.094X_{14}

F_4=−0.015X_1−0.098X_2+0.050X_3−0.089X_4+0.062X_5+0.099X_6−0.008X_7−0.069X_8−0.227X_9−0.115X_{10}+0.150X_{11}−0.524X_{12}+0.686X_{13}+0.359X_{14}

F_5=0.049X_1+0.184X_2−0.060X_3+0.221X_4+0.019X_5−0.054X_6+0.027X_7−0.611X_8+0.217X_9−0.063X_{10}+0.145X_{11}−0.152X_{12}−0.213X_{13}+0.627X_{14}

F_6=0.025X_1+0.092X_2−0.029X_3+0.037X_4+0.082X_5+0.104X_6+0.117X_7+0.337X_8+0.030X_9+0.014X_{10}−0.103X_{11}+0.114X_{12}+0.705X_{13}+0.568X_{14}

F=0.285 55F_1+0.180 80F_2+0.168 30F_3+0.090 18F_4+0.065 70F_5+0.060 69F_6

3　讨论

外观品质中,米色是评价谷子外观品质的重要指标之一,能直观反映出小米品质的优劣。目前,关于小米外观品质的研究主要集中于米色。谷子的蒸煮品质是消费者用来判断小米品质最直观的鉴定方法,它决定了谷子的经济价值[27]。淀粉糊化特性RVA特征值的分析被认为是谷子品质育种的重要选择技术[13]。淀粉含量、蛋白质含量、黄色素含量是谷子营养品质中的主要成分,其含量为食品加工、商品评级和品质育种提供重要的参考依据[28-29]。因此,筛选出外观、食味、营养品质均表现优异的种质资源具有重要意义。本研究

发现,山西省谷子地方品种的外观品质、蒸煮品质存在较大差异,其营养成分差异也较大。312份山西谷子地方品种的品质性状遗传多样性丰富,其中,淀粉含量的遗传多样性指数最大,而米色较小。相关性分析表明,外观品质与蒸煮品质、营养品质密切相关。外观品质中,小米b^*值越大,其淀粉糊化特性特征值和黄色素含量越高、淀粉含量越低,这与Zhang等[24]和王玉文等[13]的研究结果相似。蒸煮品质中,RVA特征值中的崩解值越大,淀粉含量和黄色素含量越高,适口性越好,这与李旭凯等[10]和王晶蓉[30]的研究结果相似。营养品质中,蛋白质含量越高,蒸煮品质越差。本研究结果表明蒸煮品质中的崩解值、营养品质中的蛋白质含量与米色没有直接关系,这与张凡等[31]和赵利蓉等[32]的结果相似。在一定范围内小米淀粉含量和黄色素含量越高,其外观品质中米色越黄,蒸煮品质中糊化特性越高,适口性越好,这与马宗国等[33]和杨延兵等[34]的结果也相似。本研究结果与以往诸多研究相似,意味着所选取的14个品质指标性状代表性较强,可进行谷子不同品种综合品质评估。

近年来,随着种质资源数量的不断增加,如何高效利用种质资源成为亟需解决的新问题。种质资源的精准评价是资源高效利用的前提,因此,对具有多样性和代表性的种质进行鉴定与评价具有重要意义[35]。目前,关于谷子种质资源的综合评价大多数主要集中于其农艺性状和营养品质分析,综合品质指标评估仍报道较少。例如,张晓磊等[36]选取13个主要农艺性状指标,对94份谷子种质资源进行综合评价,发现0412-1-2-1、山西白、良谷、大红袍、老虎尾、2055父、媳妇笑(蔚县)、8311、饿死牛和小竹叶青可作为育种的优良亲本材料。赵亚杰等[37]利用对197份谷子种质资源的表型遗传多样性进行分析,197份种质资源综合得分大于0.5的种质有21个,根据表型性状筛选出10份谷子优异种质。王红梅等[38]采用国内有代表性的96份谷子种质资源的直链淀粉和支链淀粉含量进行了测定,筛选出适合加工糍粑、汤圆类糯质食品的地方品种3个,为红毛谷、三爪谷和酒谷;可用于加工米粉等高膳食纤维的地方品种4个,分别为金皇谷、金棒子、茄谷和山西白米。笔者之前采用292份山西谷子地方品种对谷子米色,黄色素以及8个主要农艺性状进行综合评价,发现第266号来自忻州市繁峙县的金点鱼谷子地方品种的综合得分最高,其黄色素的含量为27.27 μg/g,CCI值为3.71,表型性状表现优异[19]。但这些研究并未对谷子外观品质、蒸煮品质、营养品质的品质指标进行综合评价,因此通过选取多方面品质指标进行综合评价筛选出具有高品质的种质具有重要意义。本研究采用312份山西谷子地方品种,选取了涉及谷子外观品质、蒸煮品质、营养品质的14个品质指标进行综合评估,发现来自长治市沁源县的小红谷综合品质最好。

在优化种质资源,选取具有代表性和多样性的种质时,由于种质资源中蕴含着丰富的遗传变异,其广泛的基因背景差异为作物育种提供了重要的物质基础。然而,数量性状的表型表达往往受到环境因素的显著影响,导致同一性状在不同年份和地点的测定结果存在较大波动。为有效消除环境因素的干扰,研究者通常采用多年多点的表型鉴定策略,并结合分子标记技术进行遗传解析[39-40]。近年来,全基因组关联分析(GWAS)技术的兴起为重要性状相关基因的挖掘提供了新的途径[41]。未来可通过整合多年多点表型数据、分子标记信息以及全基因组关联分析结果,从而更精确地解析不同品种间性状差异的遗传基础,为作物遗传改良提供理论支撑和技术支持。

4 结论

本研究选取了312份山西谷子地方品种的14个品质指标,采用遗传多样性分析、相关性分析、主成分分析对其进行综合评估,旨在筛选出外观、食味、营养品质方面最优的品种,为后续品质育种及改良提供理论依据。结果表明,不同谷子品种间蒸煮品质存在较大差异,其营养成分差异也较大;品质性状遗传多样性丰富,外观品质与蒸煮品质、营养品质密切相关。来自长治市沁源县的小红谷综合质量评估得分最高,综合结果表现优异,后期可作为培育优质谷子品种的优异资源。

参考文献

[1]Sun M J, Kang X R, Wang T T, et al. Genotypic diversity of quality traits in Chinese foxtail millet (*Setaria italica* L.) and the establishment of a quality evaluation system [J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129421.

[2]Li H, Han S L, Huo Y Q, et al. Comparative metabolomic and transcriptomic analysis reveals a coexpression network of the carotenoid metabolism pathway in the panicle of *Setaria italica* [J]. BMC Plant Biology, 2022, 22(1): 105.

[3]Hou S Y, Man X X, Lian B Y, et al. Folate metabolic profiling and expression of folate metabolism-related genes during panicle development in foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102 (1): 268-279.

[4]Tufail T, Ain H B U, Saeed F, et al. A retrospective on the innovative sustainable valorization of cereal bran in the context of circular bioeconomy innovations[J].Sustainability, 2022, 14 (21): 14597.

[5]Sharma N, Niranjan K. Foxtail millet: properties, processing, health benefits, and uses [J]. Food Reviews International, 2018, 34 (4): 329 - 363.

[6]李顺国,刘斐,刘猛,等. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学,2021,54(3):459-470.
Li S G, Liu F, Liu M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470.

[7]Peng R H, Zhang B H. Foxtail millet: a new model for C4 plants[J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(3): 199-201.

[8]He Q, Tang S, Zhi H, et al. A graph-based genome and pan-genome variation of the model plant Setaria [J]. Nature Genetics, 2023, 55(7): 1232-1242.

[9]李君霞,马小倩,代书桃,等. 谷子品质性状研究进展[J]. 河南农业科学,2023,52(9):14-23.
Li J X, Ma X Q, Dai S T, et al. Research progress on quality traits of foxtail millet [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(9): 14-23.

[10]李旭凯,胡萌萌,张义茹,等. 基于米色、转录分析探究谷子食味差异[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2019,39(5):1-9.
Li X K, Hu M M, Zhang Y R, et al. Grain color of foxtail millet impact the eating quality determined with transcriptomic technology [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 39(5): 1-9.

[11]张义茹,郭静,张韶,等. 不同米色谷子蒸煮品质研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(4):1-8.
Zhang Y R, Guo J, Zhang S, et al. Study on the cooking characteristics of foxtail millet with different grain color [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 41(4): 1-8.

[12]郭静. 中国谷子核心种质资源米汤固形物含量全基因组关联分析[D]. 太谷:山西农业大学,2022.
Guo J. Genome-wide association study on solid contentof millet porridge of core germplasm resourcesof foxtail millet [D]. Taigu:Shanxi Agricultural University,2022.

[13]王玉文,李会霞,田岗,等. 小米外观品质及淀粉RVA谱特征与米饭适口性的关系[J]. 山西农业科学,2008,36(7):34-39.
Wang Y W, Li H X, Tian G, et al. Relationship between cooked millet palatability and both visual quality and RVA profile character of starch [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008,36(7): 34-39.

[14]刘建垒,常柳,段晓亮,等. 小米营养成分及其贮藏加工稳定性研究进展[J]. 中国食物与营养,2022,28(3):55-62.
Liu J L, Chang L, Duan X L, et al. Research advancement on nutritional component of foxtail millet and their stability during storage and processing[J]. Food and Nutrition in China, 2022, 28(3): 55-62.

[15]Arora L, Aggarwal R, Dhaliwal I, et al. Assessment of sensory and nutritional attributes of foxtail millet-based food products[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1146545.

[16]郭艳萍,穆荣荣,周雨轩,等. 山西两种优质小米的营养成分分析[J]. 山西化工,2022,42(8):4-5, 17.
Guo Y P, Mu R R, Zhou Y X, et al. Nutritional composition analysis of two kinds of high quality millet in Shanxi[J].Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(8): 4-5, 17.

[17]Zhang B, Liu J, Cheng L, et al. Carotenoid composition and expression of biosynthetic genes in yellow and white foxtail millet [*Setaria italica* (L.) Beauv] [J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85: 84-90.

[18]Yang Y B, Jia G Q, Deng L G, et al. Genetic variation of yellow pigment and its components in foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.) from different eco-regions in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(11): 2459-2469.

[19]潘怡敏,阳世杰,黄蕊,等. 山西谷子主要农艺性状与黄色素含量的相关性分析[J]. 山西农业科学,2024,52(1):27-36.
Pan Y M, Yang S J, Huang R, et al. Correlation analysis between major agronomic traits and yellow pigment content of foxtail millet in Shanxi Province [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 27-36.

[20]Tang J Y, Li X K, Zhang Y K, et al. Differential flavonoids and carotenoids profiles in grains of six Poaceae crops [J]. Foods, 2022, 11(14): 2068.

[21]古兆明,古世禄. 山西谷子起源与发展研究[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007,3-7.
Gu Z M, Gu S L. Study on the origin and development of foxtail millet in Shanxi [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 3-7.

[22]王海岗,秦慧彬,温琪汾,等. 山西谷子地方品种表型鉴定与应用分析[J]. 山西农业科学,2021,49(12): 1467-1473.
Wang H G, Qin H B, Wen Q F, et al. Analysis of phenotypic identification and application of foxtail millet landraces in Shanxi Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(12): 1467-1473.

[23]肖正午,胡丽琴,黎星,等. 米粉稻早季与晚季种植品质差异研究[J]. 作物学报,2024,50(2):451-463.
Xiao Z W, Hu L Q, Li X, et al. Quality differences between noodle rice grown in early and late seasons [J]. Acta Agronomica Sinica,2024,50(2):451-463.

[24]Zhang L G, Ma K, Zhao X T, et al. Development of a comprehensive quality evaluation system for foxtail millet from different ecological regions[J]. Foods, 2023, 12(13): 2545.

[25]康庆芳,赵孟瑶,赵影,等. '晋谷21'和矮秆品系'21DG'营养品

质及代谢组学分析[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022,42(5): 66-75.
Kang Q F, Zhao M Y, Zhao Y, et al. Nutritional quality and metabonomics analysis of Foxtail millet var. 'Jingu 21' and dwarf line '21DG'[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(5): 66-75.

[26]马珂. 不同产地生态因子对晋谷21号小米品质的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2022.
Ma K. Effects of the ecological factors in differentproduction areas on the grain quality of Jingu 21 [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022.

[27]Liang K H, Liang S, Lu L G, et al. Metabolic variation and cooking qualities of millet cultivars grown both organically and conventionally [J]. Food Research International, 2018, 106: 825-833.

[28]Hou S Y, Men Y H, Wei M, et al. Total protein content, amino acid composition and eating-quality evaluation of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) P. Beauv) [J]. Foods, 2023, 12 (1): 31.

[29]杨延兵,张会笛,秦岭,等. 种植地点和加工精度对小米营养与安全品质的影响[J]. 中国粮油学报,2021,36(9): 54-59.
Yang Y B, Zhang H D, Qin L, et al. Effect of planting location and processing fineness on nutrition and safety quality of millet [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(9): 54-59.

[30]王晶蓉. 16个谷子品种蒸煮食味品质与淀粉合成酶基因核酸多态性分析[D]. 太谷:山西农业大学,2018.
Wang J R. 16 *Setaria italica* variety cooking and eating quality and starch synthase gene nucleic acid polymorphism analysis [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2018.

[31]张凡,李书田,王显瑞,等. 不同品种小米蒸煮食味品质评价及比较[J]. 食品科学,2020,41(9): 23-29.
Zhang F, Li S T, Wang X R, et al. Comparative evaluation and analysis of cooking and eating quality of different foxtail millet varieties[J]. Food Science, 2020, 41(9): 23-29.

[32]赵利蓉,马珂,张丽光,等. 不同生态区谷子品种农艺性状和品质分析[J]. 作物杂志,2022(2): 44-53.
Zhao L R, Ma K, Zhang L G, et al. Analysis of agronomic traits and quality of foxtail millet varieties in different ecological regions[J]. Crops, 2022(2): 44-53.

[33]马宗国,代聪和. 不同播期对临谷1号小米产量和外观品质的影响[J]. 陕西农业科学,2020,66(10): 49-51.
Ma Z G, Dai C H. Effects of different sowing dates on yield and appearance quality of 'Lingu 1' foxtail millet[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2020, 66(10): 49-51.

[34]杨延兵,管延安,秦岭,等. 不同地区谷子小米黄色素含量与外观品质研究[J]. 中国粮油学报,2012,27(1): 14-19.
Yang Y B, Guan Y A, Qin L, et al. The studies on yellow pigment content and appearance quality of millet from different regions [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(1): 14-19.

[35]梁红凯,赵苏蒙,陆琼,等. 谷子微核心种质的构建[J]. 作物学报,2025,51(6):1435-1444.
Liang H K, Zhao S M, Lu Q, et al. A mini-core collection of foxtail millet[J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(6): 1435-1444.

[36]张晓磊,王晓明,范光宇,等. 基于主成分分析和聚类分析的谷子种质资源主要农艺性状综合评价[J]. 山西农业科学,2025,53(1): 1-11.
Zhang X L, Wang X M, Fan G Y, et al. Comprehensive evaluation of main agronomic traits of millet germplasm resources based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53 (1): 1-11.

[37]赵雅杰,温蕊,贾祎明,等. 谷子种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 作物杂志,2025(3):61-69.
Zhao Y J, Wen R, Jia Y M, et al. Analysis of genetic diversity of phenotypic traits of foxtail millet germplasm resources[J]. Crops,2025(3):61-69.

[38]王红梅,杨天育,董孔军,等. 96份谷子种质资源淀粉多样性及优异资源鉴选利用[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(4): 13-21.
Wang H M, Yang T Y, Dong K J, et al. Diversity of starch and excellent resource selection and utilization in 96 foxtail millet germplasm resources [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 13-21.

[39]刁玉霖,朱康宁,张海金,等. 谷子主要农艺性状和品质性状遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学,2023,51(11): 73-79.
Diao Y L, Zhu K N, Zhang H J, et al. Genetic diversity analysis of main agronomic and quality traits in foxtail millet [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(11): 73-79.

[40]王怡,刘守渠,郭峰,等. 山西省不同生态区玉米品种主要农艺性状遗传分析及大斑病抗性评价[J]. 江苏农业科学,2023, 51(14): 76-83.
Wang Y, Liu S Q, Guo F, et al. Genetic analysis of main agronomic traits and resistance evaluation to northern leaf blight of maize varieties in different ecological regions of Shanxi Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(14): 76-83.

[41]阳世杰,王华智,潘怡敏,等. 山西谷子种质资源株高全基因组关联分析[J]. 作物学报,2024,50(12): 2984-2997.
Yang S J, Wang H Z, Pan Y M, et al. Genome-wide association analysis for plant height in foxtail millet (*Setaria italica* L.) germplasm resources in Shanxi, China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(12): 2984-2997.

(编辑:郭玥微)