

山西谷子主要农艺性状与黄色素含量的相关性分析

潘怡敏¹, 阳世杰¹, 黄蕊², 侯森², 王海岗²

(1. 山西农业大学 农学院, 山西 太原 030031; 2. 山西农业大学 农业基因资源研究中心, 山西 太原 030031)

摘要:为探明影响小米黄色素含量的主要因素, 以期为谷子育种中优异种质的筛选提供依据, 以山西 292 份地方品种为材料, 于 2020 年和 2022 年种植在山西农业大学东阳示范基地, 对谷子米色、黄色素 2 个品质性状和株高、颈长、叶长、叶宽、主穗长度、主穗直径、主茎节数、主茎直径共 8 个主要农艺性状进行遗传变异分析、相关性分析和主成分分析, 并基于主成分分析计算其综合得分。结果表明, 山西谷子地方品种的颈长变异最为丰富, 黄色素含量变异系数为 22.42%, 次于颈长而高于主茎直径。相关性分析表明, 黄色素含量与株高、颈长、叶长、主茎直径 4 个农艺性状和 a^* 、 b^* 、CCI 共 3 个米色相关指标均呈极显著正相关, 与主穗直径呈极显著负相关, 与主茎节数呈显著正相关。主成分分析表明, 4 个主成分的累计贡献率达到 73.62%, 可用于表述谷子黄色素含量、米色和 8 个主要农艺性状的大部分信息。可见, 小米米色是黄色素含量的重要影响因素, 谷子株高、颈长、叶长、主茎直径、主穗直径、主茎节数可能影响小米黄色素含量。依据综合得分, 发现第 266 号来自于忻州市繁峙县的金点鱼综合得分最高, 其黄色素的含量为 27.27 $\mu\text{g/g}$, CCI 值为 3.71, 表型性状表现优异。

关键词: 谷子; 地方品种; 农艺性状; 黄色素含量; 相关性分析

中图分类号: S515 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2024)01-0027-10

Correlation Analysis between Major Agronomic Traits and Yellow Pigment Content of Foxtail Millet in Shanxi Province

PAN Yimin¹, YANG Shijie¹, HUANG Rui², HOU Sen², WANG Haigang²

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China;

2. Agricultural Genetic Resources Research Center, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: To explore the main factors affecting the yellow pigment content of millet, with a view to providing a basis for the selection of superior germplasm in foxtail millet breeding, in this study, 292 local varieties from Shanxi were used as materials which were planted at the Dongyang Demonstration Base of Shanxi Agricultural University in 2020 and 2022. The genetic variation, correlation, and principal component analysis for two quality traits of cereal rice color, yellow pigment, and a total of eight major agronomic traits, including plant height, neck length, leaf length, leaf width, main panicle length, main panicle diameter, main stem nodes, and main stem diameter, were calculated and analyzed. And then the comprehensive scores were calculated based on the principal component analysis. The results showed that the local Shanxi foxtail millet varieties had the richest variation in neck length. The coefficient of variation of yellow pigment content was 22.42%, which was second to that of neck length and higher than that of main stem diameter. Correlation analysis showed that yellow pigment content was extremely significantly positive correlated with four agronomic traits of plant height, neck length, leaf length, and main stem diameter and three rice color correlation indexes of a^* , b^* , and CCI, and significantly positive correlated with main stem nodes, but extremely significant negative correlated with main panicle diameter. Principal component analysis showed that the cumulative contribution of the four principal components reached 73.62%, which could be used to express most of the information on yellow pigment content, rice color, and eight major agronomic traits in foxtail millets. In conclusion, millet rice color was an important influence on yellow pigment content, and plant height, neck length, leaf length, main stem diameter, main panicle diameter, and number of nodes in the main stem might had an effect on millet yellow pigment content. Based on the composite score, the Number 266 local variety of Golden Spot from Fanshi county, Xinzhou city, was found the elite variety with a yellow pigment content of 27.27 $\mu\text{g/g}$, a CCI value of 3.71, and an excellent performance of phenotypic traits.

Key words: foxtail millet; local variety; agronomic traits; yellow pigment content; correlation analysis

收稿日期: 2023-09-20

基金项目: 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202101140601027); 山西农业大学生物育种工程(YZGC149); 山西农业大学博士研究生启动项目(2021BQQ37)

作者简介: 潘怡敏(2000-), 女, 山西长治人, 在读硕士, 研究方向: 种质创新与遗传工程。

通信作者: 王海岗(1981-), 男, 山西平定人, 副研究员, 主要从事作物种质资源保护与利用研究工作。

谷子(脱壳后称小米)是一种古老而重要的粮食作物,属于禾本科植物^[1],有耐寒、耐旱、耐贫瘠、适应性强等特点^[2-3],最早起源于我国^[4]。在其历史悠久的栽培过程中,积累了多种类型的黄色素含量的谷子品种。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、玉米黄素以及少量的隐黄素和 β -胡萝卜素等类胡萝卜素。类胡萝卜素食用后可在人体肝脏内转化成维生素 A,具有保护视觉、上皮组织及提高机体免疫力等重要生理功能。目前,关于小米中黄色素的研究并不多。杨延兵等^[5]通过对 169 份谷子品种进行小米黄色素含量测定及外观品质鉴定,发现小米黄色素含量与外观品质呈显著正相关,是影响其外观品质的主要因素。王海棠等^[6]从黄色小米中提取黄色素,利用薄层层析技术对小米黄色素进行定性分析,发现小米黄色素的主要成分为叶黄素、玉米黄素、隐黄素等天然类胡萝卜素。贾鹏禹等^[7]和 SHEN 等^[8]相关研究人员利用高效液相色谱技术对组成黄色素的重要类胡萝卜素组分进行了定量分析,发现小米类胡萝卜素组分以叶黄素和玉米黄素为主。谷子中还富含蛋白质、脂肪、维生素 B1 和 B2 以及钙、磷、铁等矿物质,还含有丰富的纤维素,有助于促进消化系统的健康^[9-12]。谷子在农业生产和粮食供应中起着重要的作用,并且在一些地区具有经济价值和文化意义。

山西省位于中国的华北地区,是中国重要的谷子产区之一,拥有着丰富的种质资源^[13]。这些种质资源经过长期的选择和适应,具有较强的适应性、

抗逆能力以及广泛的遗传多样性^[14]。国家特色杂粮作物种质资源中期库(山西)保存全省谷子地方品种有 6 000 余份,地方品种(农家种)是经过复杂的地理生态环境适应和长期的人工选择形成的具有丰富遗传多样性的一类品种^[15]。王海岗^[16]等利用 17 个农艺性状对山西谷子地方种质进行核心库构建,表明构建的山西谷子地方品种初选核心种质能够较好地代表原始种质的遗传变异。田伯红等^[17]对河南、河北、山东等地的地方品种和育成品种进行比较,发现育成品种的主茎高度显著降低,穗质量、穗粒质量显著提高,形态性状的多样性指数大多低于地方品种。地方品种作为种质资源的重要组成部分,是种质扩增、遗传改良和创新的重要来源之一,故对其保护利用需引起高度重视^[18]。因此,整理和筛选优质地方品种不仅有利于地方品种利用和传承,还有利于培育高产、稳产、优质的谷子新品种^[19-20]。

本研究通过对山西省 292 份谷子地方品种 8 个主要农艺性状、米色及其黄色素含量进行相关性分析,探讨影响小米黄色素含量的主要因素,以期对谷子育种中优异种质的筛选提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试材料为 292 份山西谷子地方品种,所有品种均来源于山西农业大学农业基因资源研究中心种质库(表 1)。

表 1 292 份山西谷子地方品种信息
Table 1 Information of 292 Shanxi millet landraces

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI
1	压塌车	大同市	3.63	14	小白谷	大同市灵丘县	3.76	27	各谷	晋中市平遥县	3.19
2	毛白谷	朔州市山阴县	3.07	15	谷龙爪粘谷	大同市广灵县	2.65	28	小孟县谷	晋中市和顺县	3.50
3	牛毛红	大同市阳高县	4.06	16	青软谷	朔州市山阴县	3.15	29	铁鞭杆谷	阳泉市郊区	3.74
4	大同红谷	大同市广灵县	3.70	17	狼尾巴粘谷	大同市广灵县	3.19	30	丫丫贴黄	晋中市寿阳县	3.61
5	白油谷	大同市	3.31	18	压塌车	忻州市定襄县	3.86	31	牛毛黄	阳泉市郊区	4.15
6	毛梁谷	朔州市山阴县	3.29	19	大金股	忻州市静乐县	3.77	32	平遥谷	吕梁市离石区	3.96
7	二紫谷	朔州市山阴县	3.00	20	齐头黄	忻州市河曲县	3.54	33	代州谷	吕梁市临县	3.90
8	红腿谷	大同市	3.69	21	铁卜罗	忻州市定襄县	3.78	34	六月黄	晋中市左权县	3.74
9	白谷子	大同市阳高县	3.48	22	黄软谷	忻州市神池县	3.55	35	知州谷	吕梁市中阳县	4.16
10	黑大青谷	大同市阳高县	3.75	23	黄软谷	忻州市繁峙县	2.78	36	母老鼠	阳泉市平定县	3.44
11	霸王鞭	大同市浑源县	3.95	24	大白软谷	忻州市五台县	3.07	37	小谷子	晋中市太谷区	3.50
12	大红黄谷	大同市广灵县	3.44	25	球沙硬谷	吕梁市临县	3.47	38	红草谷	太原市阳曲县	3.59
13	油沙白	大同市灵丘县	3.22	26	一拳三	晋中市昔阳县	3.35	39	紫秆谷	晋中市平遥县	3.38

续表1 292份山西谷子地方品种信息
Tab.1(Continued) Information of 292 Shanxi millet landraces

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI
40	紫根黄	太原市阳曲县	3.59	86	豆花谷	太原市阳曲县	3.59	132	不断青	晋城市陵川县	3.82
41	代州黄	晋中市介休市	3.52	87	大青谷	晋中市寿阳县	3.62	133	白瓜谷	长治市沁县	3.03
42	玉皇谷	吕梁市离石区	3.77	88	气死牛	晋中市和顺县	3.63	134	小白谷	长治市长子县	3.40
43	触地黄	晋中市寿阳县	3.92	89	软谷	晋中市昔阳县	3.10	135	黄米糙	长治市沁县	3.60
44	二黄谷	吕梁市汾阳市	3.48	90	三变化	太原市阳曲县	3.56	136	一条红	长治市潞城市	3.64
45	大黄谷	晋中市左权县	3.59	91	石榴谷	太原市清徐	3.40	137	小黄谷	大同市天镇县	3.56
46	大黄谷	吕梁市汾阳市	3.62	92	连谷	晋中市平遥县	3.47	138	青谷子	大同市天镇县	3.66
47	三根齐毛谷	晋中市榆次区	3.48	93	猪咀谷	阳泉市孟县	3.58	139	野生谷	大同市天镇县	3.61
48	九格楞	晋中市昔阳县	4.01	94	猪汉肠软谷	吕梁市离石区	3.04	140	黄糕谷	大同市阳高县	2.66
49	铁牛谷	晋中市榆次区	3.59	95	海鸭腿	吕梁市兴县	3.26	141	小黄谷	大同市大同县	3.26
50	猪屎谷	晋中市榆社县	3.94	96	白流沙	吕梁市方山县	3.78	142	东方亮	大同市大同县	3.03
51	娥阳谷	吕梁市交城县	3.42	97	七月黄	吕梁市岚县	3.60	143	小白谷	大同市新荣区	3.64
52	绳绳谷	晋中市平遥县	3.65	98	灰良谷	吕梁市兴县	3.49	144	进军曲	大同市南郊区	3.50
53	二虎尾	太原市清徐	3.58	99	大黄谷	吕梁市方山县	3.41	145	黄软谷	大同市南郊区	3.33
54	八一—谷	吕梁市临县	3.78	100	打锣锤	吕梁市中阳县	3.22	146	紫杆谷	大同市南郊区	3.05
55	大对着谷	吕梁市交城县	3.62	101	珠沙软谷	吕梁市临县	3.35	147	小白谷	大同市广灵县	3.78
56	铁巴其	晋中市榆社县	3.79	102	红小谷	吕梁市临县	3.34	148	三变化	大同市广灵县	2.95
57	蛇儿谷	晋中市太谷县	2.72	103	晋谷6号	吕梁市汾阳市	3.37	149	大凉谷	大同市广灵县	2.92
58	一拳三	晋中市昔阳县	3.29	104	向阳谷	吕梁市中阳县	3.67	150	金龙瓜巴色	大同市广灵县	3.36
59	小黄谷	晋中市昔阳县	3.62	105	伏尽糙	长治市平顺县	3.39	151	秋露白	大同市广灵县	3.11
60	小红谷	吕梁市汾阳市	3.91	106	边区一号	晋城市高平市	3.19	152	智包梁柳	大同市广灵县	3.39
61	白支安青	晋中市平遥县	3.43	107	麦种长	长治市平顺县	3.60	153	触坡黄	大同市广灵县	3.05
62	毛尖谷	太原市阳曲县	3.59	108	媳妇糙	长治市平顺县	3.87	154	山东红	大同市灵丘县	3.30
63	毛黄谷	晋中市左权县	4.07	109	河南糙	长治市壶关县	3.53	155	兔嘴粘谷	大同市灵丘县	3.28
64	太一	太原市小店区	3.99	110	小谷子	长治市武乡县	3.59	156	二白软谷	朔州市应县	3.51
65	铁牛吼	阳泉市郊区	3.57	111	黎城谷	长治市武乡县	3.14	157	垆谷	朔州市应县	2.71
66	压塌车	晋中市左权县	3.53	112	娥秩谷	长治市武乡县	3.18	158	辽东黄	大同市左云县	3.21
67	水白造	晋中市左权县	3.58	113	老一条红	长治市平顺县	3.74	159	紫杆谷	大同市左云县	3.64
68	白流沙	晋中市左权县	3.75	114	糙黄谷	长治市潞城市	3.68	160	二白流沙	朔州市右玉县	3.61
69	饿死牛	晋中市榆次区	3.53	115	紫杆黄	长治市襄垣县	3.22	161	多穗谷	朔州市山阴县	3.30
70	翟老婆1	晋中市和顺县	3.17	116	长象白	长治市襄垣县	3.60	162	大红袍	朔州市朔城区	3.51
71	东和谷	阳泉市平定县	3.57	117	香色谷	晋城市陵川县	3.20	163	压塌车	忻州市繁峙县	3.43
72	一窝蛇	阳泉市孟县	3.79	118	红苗毛谷	长治市平顺县	3.46	164	黑谷	忻州市原平市	3.29
73	伏谷子	晋中市平遥县	3.44	119	紫杆黄	长治市壶关县	3.60	165	海福混	忻州市定襄县	2.90
74	红苗白谷	晋中市寿阳县	3.63	120	猫蹄谷	长治市壶关县	3.55	166	北京白谷	忻州市	3.62
75	砖灰谷	晋中市寿阳县	2.99	121	红花钻	长治市武乡县	3.61	167	白苗粘谷	阳泉市孟县	3.57
76	紫杆谷	晋中市左权县	3.44	122	小红谷	长治市屯留县	3.59	168	红石榴	阳泉市孟县	3.38
77	四杆旗	吕梁市孝义市	3.71	123	软黑谷	长治市屯留县	3.70	169	河不死	阳泉市孟县	2.98
78	九根支	吕梁市汾阳市	3.79	124	小白米谷	长治市平顺县	3.83	170	临秋变	阳泉市孟县	3.36
79	大白谷	晋中市榆次区	3.53	125	红软谷	长治市武乡县	3.68	171	赛头红	阳泉市孟县	3.92
80	白谷	晋中市平遥县	3.42	126	大白谷	长治市潞城市	3.50	172	媳妇笑	晋中市昔阳县	3.71
81	白流沙	太原市阳曲县	3.50	127	白母鸡咀	长治市屯留县	3.83	173	寿阳黄	太原市阳曲县	3.70
82	小白流沙	晋中市灵石县	3.80	128	青谷	长治市屯留县	2.81	174	红流沙	太原市万柏林区	3.72
83	中对则	吕梁市临县	3.34	129	黄沙谷	长治市长子县	3.80	175	软谷	太原市万柏林区	3.27
84	圪了腰	晋中市和顺县	3.53	130	八升米	长治市长子县	3.31	176	寸寸谷	太原市万柏林区	3.78
85	铁乔谷	晋中市和顺县	3.55	131	小黄谷	长治市襄垣县	3.30	177	红苗谷	晋中市榆次区	3.34

续表 1 292 份山西谷子地方品种信息
Tab.1(Continued) Information of 292 Shanxi millet landraces

序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI 值	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI	序号 No.	种质名称 Germplasm name	来源 Source	CCI
178	黄毛谷	晋中市榆次区	3.69	217	尖嘴黄谷子	晋中市介休市	3.21	255	猫尾巴谷	临汾市吉县	3.27
179	小砖灰	晋中市寿阳县	3.12	218	高秆白毛谷	晋中市介休市	3.41	256	尺八量	临汾市乡宁县	2.74
180	白苗蛇谷	晋中市寿阳县	3.43	219	紫秆软谷	晋中市介休市	2.73	257	把子谷	临汾市乡宁县	3.42
181	石榴榴	晋中市寿阳县	3.35	220	露米黄	晋中市介休市	3.31	258	高秆黄	运城市垣曲县	3.55
182	紫根白	晋中市寿阳县	3.89	221	人人爱	晋中市灵石县	3.43	259	洋谷	运城市平陆县	3.12
183	76谷	晋中市寿阳县	3.03	222	红谷	晋中市灵石县	2.40	260	黄谷	运城市平陆县	3.13
184	红龙爪粘谷	晋中市和顺县	3.60	223	红熟谷	吕梁市岚县	2.85	261	黄软谷	运城市平陆县	3.04
185	红苗毛谷	晋中市和顺县	3.41	224	繁峙谷	吕梁市岚县	3.07	262	马缰绳	运城市永济县	3.30
186	一丈黄	晋中市和顺县	3.45	225	九杆旗	吕梁市孝义市	3.56	263	酒谷	运城市永济县	3.24
187	川谷	晋中市左权县	3.52	226	白软谷	长治市武乡县	3.47	264	色杆白	大同市天镇县	3.51
188	母鸡嘴	晋中市左权县	3.54	227	小红谷	长治市沁源县	3.80	265	黄单子谷	大同市	3.22
189	竹叶青	晋中市左权县	3.81	228	小灰谷	长治市黎城县	3.78	266	金点鱼	忻州市繁峙县	3.71
190	红谷	晋中市左权县	3.71	229	良谷	长治市黎城县	3.22	267	红苗石榴谷	阳泉市平定县	3.18
191	老来白	晋中市左权县	3.42	230	紫秆良	长治市黎城县	3.36	268	大同黄	晋中市寿阳县	3.59
192	老来白谷	晋中市左权县	3.79	231	南脑谷	长治市襄垣县	3.63	269	白苗黄谷	晋中市左权县	3.73
193	铁条谷	晋中市左权县	3.35	232	白流沙谷	长治市长子县	3.63	270	朱砂红谷	晋中市平遥县	3.66
194	黑临秋	晋中市左权县	3.76	233	早春谷	长治市平顺县	3.30	271	白料角软谷	吕梁市石楼县	3.29
195	黄沙谷	晋中市榆社县	3.32	234	猫蹄软谷	长治市平顺县	3.48	272	红谷	吕梁市石楼县	3.81
196	白母鸡	晋中市太谷区	3.69	235	鞭杆黄	长治市平顺县	3.52	273	优质34号	吕梁市汾阳市	3.66
197	红金板	晋中市太谷区	3.65	236	九根青谷	晋城市高平市	3.36	274	特早3号	吕梁市汾阳市	3.74
198	谷子	晋中市太谷区	3.53	237	朱砂红	晋城市高平市	3.79	275	特早7号	吕梁市汾阳市	3.01
199	沁州黄	晋中市太谷区	3.77	238	气死风	晋城市晋城县	3.49	276	禾谷子	运城市万荣县	3.17
200	晋谷21号	吕梁市汾阳市	3.75	239	青谷	临汾市蒲县	3.05	277	大同15号	大同市云州区	3.57
201	大毛谷	晋中市祁县	3.60	240	紧穗密码黑黄穗	临汾市蒲县	3.79	278	黑选1号	太原市小店区	3.91
202	小白谷	晋中市祁县	3.54	241	圪垛凹	临汾市古县	3.31	279	谷子	运城市夏县	3.61
203	三黄谷	晋中市祁县	3.43	242	秋不死	临汾市古县	3.56	280	红谷子	忻州市岢岚县	3.81
204	尺八量	晋中市祁县	3.36	243	红酒谷	临汾市安泽县	3.39	281	白谷子	晋城市陵川县	3.56
205	小红谷	晋中市平遥县	3.60	244	青米谷	临汾市安泽县	3.07	282	谷子	运城市夏县	3.60
206	文水谷	晋中市平遥县	3.76	245	长毛大黄谷	临汾市浮山县	3.40	283	小红谷	大同市浑源县	3.80
207	毛毛谷	晋中市平遥县	3.49	246	红杆毛谷	临汾市浮山县	3.52	284	谷子	大同市右玉县	3.44
208	白秆草黄谷	晋中市平遥县	3.28	247	大毛谷	临汾市尧都区	3.50	285	黄谷	大同市浑源县	3.60
209	白流沙	晋中市平遥县	3.67	248	毛谷	临汾市翼城县	3.41	286	小软谷	晋城市陵川县	3.00
210	平新谷	晋中市平遥县	3.29	249	刘沟谷	临汾市翼城县	2.96	287	小红谷	忻州市原平市	3.65
211	秋不死	晋中市平遥县	3.44	250	小红谷	临汾市曲沃县	3.45	288	沁州黄	忻州市原平市	3.66
212	黑软谷	晋中市平遥县	3.90	251	黄谷	临汾市曲沃县	4.02	289	拖叶黄	忻州市原平市	3.27
213	晋谷21号	吕梁市汾阳市	3.60	252	酒谷	临汾市侯马市	3.56	290	软谷	忻州市定襄县	2.98
214	露米黄	晋中市平遥县	3.55	253	猪粪谷	临汾市永和县	3.40	291	交谷	忻州市忻府区	3.55
215	毛尖谷	晋中市介休市	3.51	254	大头毛谷	临汾市大宁县	3.29	292	齐头谷	忻州市偏关县	3.02
216	打锣锤软谷	晋中市介休市	3.10								

1.2 试验方法

在2020、2022年将292份山西谷子地方品种种植在山西农业大学农业基因资源研究中心东阳试验基地(37.6°N、112.7°E),每个品种种2行,行长0.5 m,行距0.4 m,5月中旬播种,其他管理措施按照

常规田进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农艺性状 成熟期按照《谷子种质资源描述规范和数据标准》^[21]测定谷子农艺性状,包括株高、颈长、叶长、叶宽等。

1.3.2 米色色差 使用YS3010光栅分光测色仪(深圳市三恩时科技有限公司)对米色进行测定与分析。将成熟谷子收获脱壳后得到小米,使用分光测色仪进行米色色差测定,测定L*、a*、b*、CCI,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,0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,表现出明显的品种差异,整体趋势为黄色最高,绿色次之,白色最低,可有效对不同品种米色性状进行鉴定。每个品种3次重复,取平均值。

1.3.3 黄色素含量 将米色色差分析后的小米重新收集,黄色素含量测定方法参考AACC方法。称取0.5 g粉末放入约50 mL棕色离心管,加入10 mL水饱和正丁醇,盖紧塞子,放入70 °C水浴锅内加热45 min,每5 min取出振荡一次,结束后立即冰浴冷却10 min。之后分别加入0.75 mL NaCl溶液

(175.2 g/L),用10 mL乙酸乙酯/正己烷(V:V=1:9)萃取3次,每次用1 000 r/min离心1 min收集有机相,后加入5 mL蒸馏水去除杂质,移去蒸馏水后再加入2 g无水硫酸钠,转移至另一干燥离心管中,氮气吹干后用1 mL含0.1%BHT的MTBE溶剂重新溶解,0.2 mm有机相滤膜过滤后,放入棕色试剂瓶中采用高效液相色谱仪测量其黄色素含量。

1.4 数据分析

数据统计分析利用IBM SPSS Statistics 26.0和Excel 2016软件;作图利用Origin 64和Adobe Illustrator 2022软件。

2 结果和分析

2.1 谷子农艺性状、籽粒色差分析及黄色素含量分析

山西地方品种农艺性状和黄色素含量的统计情况如表2所示。

表2 山西地方品种农艺性状和黄色素含量的统计情况
Tab.2 Statistics of agronomic traits and yellow pigment content of local varieties in Shanxi

年份 Year	性状 Trait	平均值±标准差 Mean±SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数/% CV	变幅 Range
2020	PH/cm	119.88±21.00	-0.67	0.61	17.51	40.80~163.60
2022		119.74±17.41	-0.87	0.96	14.54	53.33~157.67
2020	NL/cm	31.55±5.51	0.17	0.06	17.47	15.20~49.20
2022		30.64±11.2	6.19	57.57	36.55	12.00~142.00
2020	LL/cm	49.09±6.69	-0.45	1.00	13.64	26.60~70.20
2022		47.31±6.73	-0.56	0.82	14.22	23.33~62.33
2020	LW/cm	2.88±0.33	-0.32	2.14	11.59	1.44~4.06
2022		2.73±0.38	0.23	0.16	13.99	1.73~3.93
2020	MPL/cm	28.69±5.36	0.11	0.91	18.68	13.60~51.60
2022		27.62±5.65	0.18	0.38	20.44	13.00~48.00
2020	MPD/cm	2.47±0.53	1.44	7.10	21.35	1.01~6.04
2022		2.52±0.52	0.90	1.47	20.61	1.47~4.87
2020	MSN	11.90±1.63	-0.47	0.40	13.69	6.60~15.80
2022		12.39±1.57	-0.40	0.29	12.65	7.67~17.00
2020	MSD /cm	0.72±0.10	-0.56	0.70	14.26	0.33~0.97
2022		0.69±0.10	0.17	0.80	15.06	0.39~1.12
2020	L*	66.03±3.01	-1.45	4.45	4.56	53.25~73.24
2022		62.52±2.89	-1.92	10.78	4.62	41.62~69.6
2020	a*	5.49±0.82	-2.19	7.07	14.91	1.63~7.01
2022		6.00±0.94	-1.92	5.86	15.72	0.72~7.83
2020	b*	24.84±2.62	-2.59	8.96	10.55	11.84~29.56
2022		26.45±3.04	-2.35	9.48	11.50	6.07~31.63
2020	CCI	3.34±0.31	-0.26	0.40	9.33	2.46~4.23
2022		3.62±0.36	-0.48	0.44	10.05	2.22~4.43
	YP/(μg/g)	25.16±5.64	-0.32	2.05	22.42	3.39~43.94

注:PH.株高;NL.颈长;LL.叶长;LW.叶宽;MPL.主穗长度;MPD.主穗直径;MSN.主茎节数;MSD.主茎直径;YP.黄色素。下表同。

Note: PH. Plant height; NL. Neck length; LL. Leaf length; LW. Leaf width; MPL. Main panicle length; MPD. Main panicle diameter; MSN. Main stem nodes; MSD. Main stem diameter; YP. Yellow pigment. The same as below.

综合 2 a 数据可知(表 2),292 份谷子地方品种的 8 个主要农艺性状中在种植过程中的平均值差异不明显,说明环境对农艺性状的影响差异较小。2 a 农艺性状变异系数大小表现为颈长>颈粗>穗长>株高>主茎直径>叶长>主茎节数>叶宽,表明山西谷子地方品种的颈长变异丰富。其中,第 241 号谷子地方品种圪垛凹的颈长最长,为 49.2 cm,来自于临汾市古县。不同来源地的谷子资源农艺性状间存在着明显的差异,了解谷子农艺性状间的相互关联性,有利于育种目标性状的确定^[22]。

在米色相关指标中,变异系数大小表现为 $a^* > b^* > CCI > L^*$ 。CCI 作为衡量谷子米色的综合指标,表现出明显的差异,整体趋势为米色越黄的谷子地方品种的 CCI 值越高,绿色次之,白色最低。其中,

2020 年时第 35 号的谷子地方品种玉皇谷米色 CCI 值最高,为 4.23,来源于吕梁市离石区,2022 年时第 251 号的谷子地方品种黄谷的 CCI 值最大,为 4.43,来源于临汾市曲沃县。

黄色素含量变异系数明显高于米色相关指标。黄色素含量变异系数为 22.42%,次于颈长而高于主茎直径,变幅为 3.39~43.94 $\mu\text{g/g}$,大多数集中在 20 $\mu\text{g/g}$ 左右,黄色素含量较高的地方品种占少数(图 2),表明黄色素含量的变异类型也十分丰富。其中,第 222 号谷子地方品种黄色素含量最低,为晋中市灵石县的红谷,第 282 号谷子地方品种黄色素含量最高,为运城市夏县的谷子。结合图 1、2 可知,2 a 所测各性状基本符合正态分布规律。

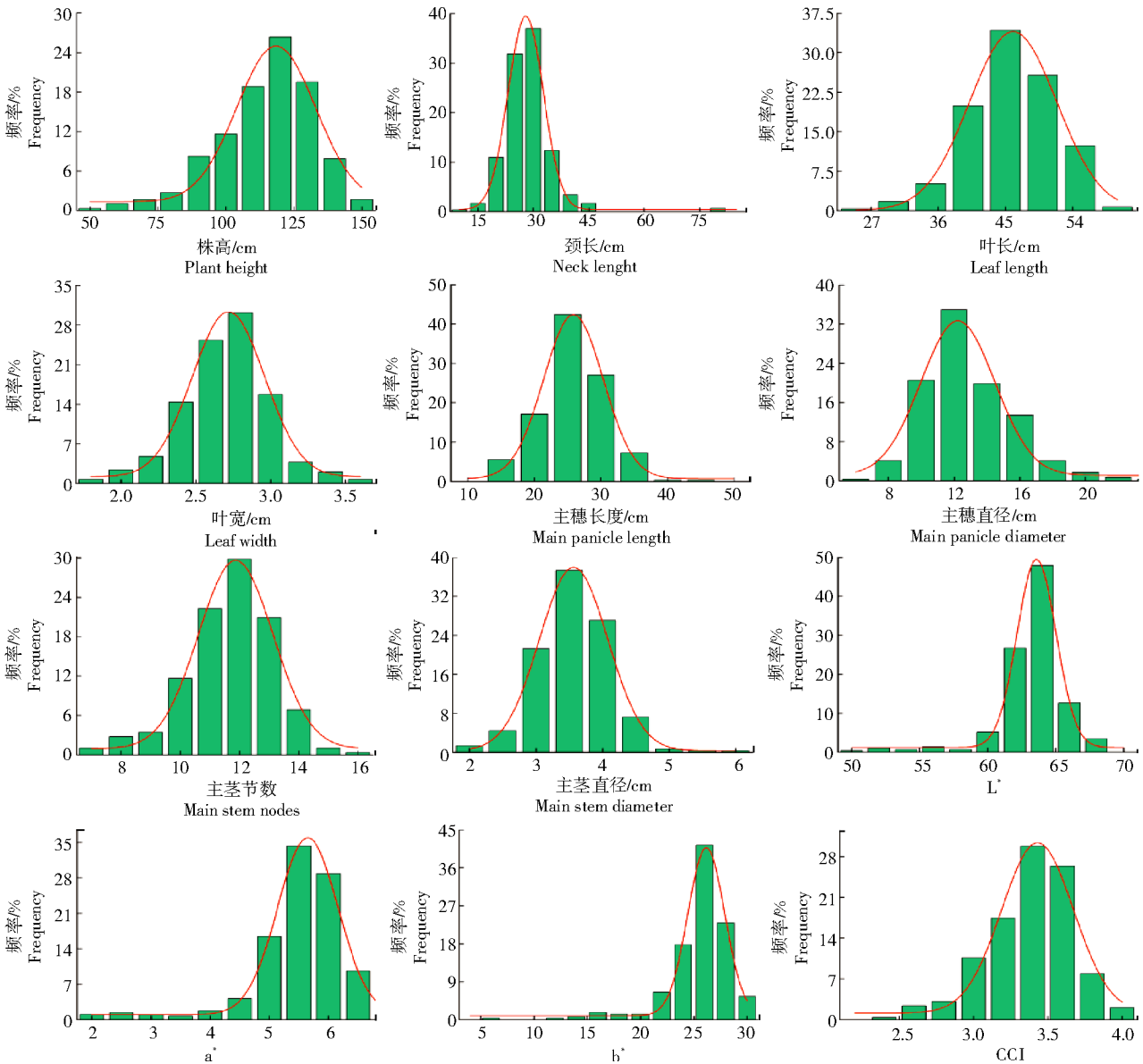


图 1 山西地方品种农艺性状和米色的频率分布
Fig.1 Frequency distribution of major agronomic traits and rice color of local varieties in Shanxi

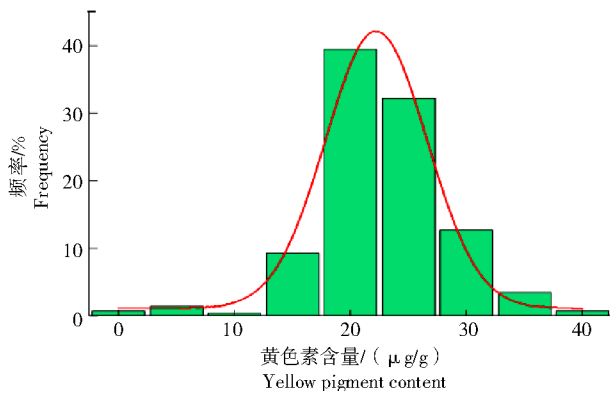


图2 山西地方品种黄色素含量频率分布
Fig.2 Frequency distribution of yellow pigment content of local varieties in Shanxi

2.2 谷子农艺性状、米色色差及黄色素含量的相关性分析

由表3可知,谷子地方品种的黄色素含量与株高、颈长、叶长、主茎直径4个农艺性状和 a^* 、 b^* 、CCI等3个米色相关指标均呈极显著正相关,与主穗直径呈极显著负相关,与主茎节数呈显著正相关。株高与颈长、叶长、叶宽、主穗长度、主茎节数、主茎直径6个农艺性状和 a^* 、 b^* 、CCI共3个米色相关指标

以及黄色素含量均呈现极显著正相关。颈长与叶长、叶宽、主穗长度、主茎节数4个农艺性状和 a^* 、 b^* 、CCI共3个米色相关指标均呈极显著正相关,与主穗直径呈显著正相关。叶长与主穗直径和黄色素含量均呈极显著正相关。叶宽与主穗长度和主穗直径2个农艺性状和 L^* 1个米色相关指标均呈极显著正相关,与CCI呈显著负相关。主穗长度与主茎直径呈极显著正相关,和 L^* 呈显著正相关。主穗直径与 a^* 、 b^* 、CCI共3个米色相关指标和黄色素含量均呈极显著负相关,与 L^* 呈显著正相关。主茎节数与主茎直径以及 a^* 、 b^* 、CCI共3个米色相关指标和黄色素含量均呈极显著正相关,与 L^* 呈极显著负相关。主茎直径与 a^* 、 b^* 、CCI和黄色素含量均呈极显著正相关,与 L^* 呈极显著负相关。 L^* 与 a^* 、 b^* 、CCI均呈极显著正相关。 a^* 与 b^* 、CCI、黄色素含量均呈极显著正相关。 b^* 与CCI、黄色素含量均呈极显著正相关。CCI与黄色素含量呈极显著正相关。通过相关性分析发现,在4个米色相关指标中, L^* 与黄色素含量不相关, a^* 、 b^* 、CCI值与黄色素含量呈极显著正相关关系。

表3 山西地方品种农艺性状和黄色素含量的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between agronomic traits and yellow pigment content of local varieties in Shanxi province

性状 Trait	PH	NL	LL	LW	MPL	MPD	MSN	MSD	L^*	a^*	b^*	CCI	YP
PH	1												
NL	0.819**	1											
LL	0.214**	0.121**	1										
LW	0.192**	0.315**	0.023	1									
MPL	0.209**	0.211**	0.029	0.399**	1								
MPD	0.020	0.099*	0.272**	0.624**	0.364**	1							
MSN	0.297**	0.117**	-0.042	-0.050	-0.041	-0.023	1						
MSD	0.198**	0.035	-0.053	-0.068	-0.066	-0.049	0.942**	1					
L^*	-0.051	0.046	0.011	0.128**	0.105*	0.086*	-0.484**	-0.480**	1				
a^*	0.250**	0.216**	-0.075	-0.040	0.007	-0.164**	0.295**	0.295**	0.224**	1			
b^*	0.194**	0.145**	-0.052	-0.025	0.002	-0.124**	0.290**	0.293**	0.421**	0.885**	1		
CCI	0.217**	0.167**	-0.053	-0.0870*	-0.02	-0.145**	0.381**	0.378**	0.471**	0.619**	0.235**	1	
YP	0.206**	0.167**	0.179**	-0.041	0.103	-0.213**	0.123*	0.200**	-0.056	0.360**	0.360**	0.206**	1

注: *和**分别表示在 $P<0.05$ 水平显著相关和 $P<0.01$ 水平极显著相关。

Note: * and ** indicated significant correlation at the $P<0.05$ level and extremely significant correlation at the $P<0.01$ level, respectively.

2.3 谷子农艺性状、米色色差及黄色素含量的主成分分析

基于292份山西谷子地方品种的8个主要农艺性状、CCI米色综合指标和黄色素含量进行主成分分析(表4),发现4个主成分的累计贡献率达到73.62%。因此,将这10个性状指标降维生成4个

新的影响因子。第I主成分贡献率为31.81%;第II主成分贡献率为19.63%;第III主成分贡献率为11.50%;第IV主成分贡献率为10.68%;第I主成分解释了10个性状指标31.81%的变化,特征向量绝对值较大的是主茎节数(0.81)、主茎直径(0.80)、株高(0.79),结合相关性分析(表3),主茎节数、主

茎直径、株高与黄色素含量呈显著正相关,这些性状与植株茎部形态有关,故称为茎部形态因子。第 II 主成分特征向量绝对值最大的是主穗长度(0.79),第 III 主成分特征向量绝对值最大的是主穗

直径(0.65),故称为穗部形态因子。第 IV 主成分特征向量绝对值最大的是 CCI(0.63),故称为米色形态因子。

表 4 292 份山西谷子地方品种资源性状的主成分分析
Tab.4 Principal component analysis of resource traits of 292 Shanxi foxtail millets local varieties

性状 Trait	主成分 Principal component				性状 Trait	主成分 Principal component			
	I	II	III	IV		I	II	III	IV
MSN	0.81	-0.32	-0.35	-0.13	NL	-0.15	0.53	0.08	0.48
MSD	0.80	0.07	0.11	-0.13	MPD	0.56	-0.03	0.65	-0.25
PH	0.79	-0.24	-0.46	-0.03	CCI	0.18	-0.53	-0.02	0.63
LW	0.65	0.21	0.48	0.06	特征值 E	3.18	1.96	1.15	1.07
LL	0.56	0.54	-0.23	0.19	百分率/% CR	31.81	19.63	11.50	10.68
MPL	0.33	0.79	-0.12	0.23	累计百分率/% CCR	31.81	51.44	62.94	73.62
YP	0.23	-0.53	0.28	0.49					

2.4 综合得分

基于主成分分析模型,对这 10 个性状指标降维后的因子计算其综合得分 F 值(表 5),取综合得分排名前 10 的谷子地方品种的种质资源,分析发现,来自于第 266 号忻州市繁峙县的金点鱼谷子综合得分最高,其黄色素的含量为 27.27 $\mu\text{g/g}$,CCI 值为 3.71;其次为第 81 号太原市阳曲县的白流沙,黄色素含量为 29.83 $\mu\text{g/g}$,CCI 值为 3.50;第 3

为第 65 号阳泉市郊区的铁牛吼,黄色素含量为 23.99 $\mu\text{g/g}$,CCI 值为 3.58。这 3 种谷子种质资源在本次试验中综合性状排名前 3,后期可为培育谷子新品种提供选择依据。同时,观察发现,排名前 10 的谷子地方品种的种质资源中综合得分越好的品种,其黄色素含量和 CCI 值也越高。因此,本试验得出黄色素含量较高的品种其综合得分越好,该品种的综合性状越强。

表 5 综合得分排名前 10 的山西谷子地方品种资源
Tab.5 Local varietal resources of Shanxi foxtail millets with top 10 comprehensive scores

性状 Trait	序号 Number									
	266	81	65	101	62	222	239	245	234	226
MSN	11.23	15.13	14.07	11.93	13.90	11.80	13.63	13.60	14.50	12.37
MSD/cm	3.71	4.90	5.55	3.97	6.01	3.91	4.40	3.50	3.93	4.50
PH/cm	118.50	157.03	154.97	138.80	139.20	128.50	135.83	148.97	136.13	135.87
LW/cm	2.87	3.03	3.09	3.04	3.38	2.78	2.97	2.55	2.46	2.97
LL/cm	63.67	52.27	50.83	57.77	55.60	56.37	58.57	57.73	56.00	41.20
MPL/cm	49.80	32.00	31.03	37.07	34.13	41.70	34.50	30.40	38.43	32.63
YP/($\mu\text{g/g}$)	27.27	29.83	23.99	24.75	32.55	24.49	25.97	26.38	21.82	24.49
NL/cm	35.37	30.73	23.23	33.27	36.63	41.63	31.60	29.47	26.20	82.27
MPD/cm	13.25	14.95	22.11	14.59	17.48	12.26	14.44	11.03	11.80	17.32
CCI	3.71	3.50	3.58	3.35	3.59	2.40	3.05	3.40	3.48	3.47
排名 Ranking	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

3 结论与讨论

米色是评价谷子品质优良的重要指标之一,其能直观反映出小米品质的优劣。米色越黄,其适口性越好^[23-24]。本研究发现,在米色相关指标中,变异系数表现为 $a^* > b^* > \text{CCI} > L^*$ 。这与张婷^[25]等

对 3 届参加优质米评选的谷子 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值统计情况中变异系数的结果一致。张耀元等^[26]认为,CCI 指数可以作为测定米色的综合指标,对不同谷子地方品种进行米色鉴定,故在对不同地方品种进行主成分降维分析以及计算其综合得分时,采用 CCI 米色综合指标来表征米色的相关差异。

黄色素是谷子籽粒中的天然色素,主要成分为类胡萝卜素。在小米外观品质中,黄色程度的深浅是最主要的关注因素,而类胡萝卜素等黄色素含量决定了黄色深浅。本研究对292份山西谷子地方品种的黄色素含量与主要农艺性状及其米色色差进行相关性分析,进而为筛选出高黄色素含量的品种提供依据。本试验得出,小米黄色素含量与株高、颈长、叶长、主茎直径、主穗直径、主茎节数6个农艺性状和 a^* 、 b^* 、CCI共3个米色相关指标存在显著相关。陈慢慢等^[27]研究发现,谷子黄色素含量与直链淀粉、株高、茎节数呈极显著正相关,与穗粒质量呈显著正相关,与叶面积呈极显著负相关。叶面积、株高和穗长是影响黄色素含量的最主要因素。结合本试验结果,株高和主茎节数都被证明与黄色素含量呈正向的影响关系。笔者认为谷子株高、颈长、叶长、主茎直径、主穗直径、主茎节数可能是影响小米黄色素含量的因素。前人研究已鉴定米色是黄色素含量的重要影响因素,如杨延兵等^[28-29]研究结果表明,品种基因型是决定谷子黄色素含量的最重要因素,不同年份、地点、品种及各因素互作有着较大影响,且小米黄色素含量与外观品质呈显著正相关,是影响其外观品质的重要因素。黄色素含量高的育种材料米色品质也较优。但上述农艺性状是如何对小米黄色素含量进行影响的以及影响效果具体如何,目前还未发现相关报道,后续笔者将持续对其进行研究。

综合2a的数据,依据292份山西地方品种的综合得分,本研究得出,来自于第266号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 $27.27 \mu\text{g/g}$,CCI值为3.71。黄色素含量和CCI值越高的品种其综合得分也越好。因此,来自于忻州市繁峙县的金点鱼表型性状表现优异,后期可为谷子培育优质种质资源提供选择依据。

参考文献:

- [1] 李荣德,程汝宏,陈应志,等.《种子法》实施以来我国谷子品种管理的成效与建议[J].中国种业,2019(3):26-29.
LI R D, CHENG R H, CHEN Y Z, et al. Effects and suggestions on the management of millet varieties in China since the implementation of the Seed Law[J]. China Seed Industry, 2019(3):26-29.
- [2] 禾璐,杨阳,王宇坤,等.谷子功能基因发掘现状及展望[J].山西农业大学学报(自然科学版),2022,42(4):1-10.
HE L, YANG Y, WANG Y S, et al. The current situation and perspective of functional gene discovery in foxtail millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2022,42(4):1-10.
- [3] 冯链,田翔,乔治军,等.谷子农艺性状与蛋白质含量相关性分析[J].河南农业科学,2022,51(6):43-53.
FENG L, TIAN X, QIAO Z J, et al. Correlation analysis between protein content and agronomic traits of foxtail millet[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022,51(6):43-53.
- [4] ZHANG G Y, LIU X, QUAN Z W, et al. Genome sequence of foxtail millet(*Setaria italica*) provides insights into grass evolution and biofuel potential[J]. Nature Biotechnology, 2012, 30: 549-554.
- [5] 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.
- [6] 王海棠,尹卫平,阳勇,等.小米黄色素的初步研究——化学成分及应用研究[J].中国粮油学报,2004,19(3):26-30.
WANG H T, YIN W P, YANG Y, et al. Primary study on millet yellow pigment-study on chemical constituents and application of millet yellow pigment[J]. Chinese Cereals and Oils Association, 2004,19(3):26-30.
- [7] 贾鹏禹,李朝阳,曹龙奎,等.高效液相色谱法测定小米中黄色素的含量[J].黑龙江八一农垦大学学报,2015,27(5):111-115.
JIA P Y, LI C Y, CAO L K, et al. Determination of yellow pigment in millet by HPLC[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015,27(5):111-115.
- [8] SHEN R, YANG S P, ZHAO G H, et al. Identification of carotenoids in foxtail millet(*Setaria italica*) and the effects of cooking methods on carotenoid content[J]. Journal of Cereal Science, 2015,61:86-93.
- [9] 薛月圆,李鹏,林勤保.小米的化学成分及物理性质的研究进展[J].中国粮油学报,2008,23(3):199-203.
XUE Y Y, LI P, LIN Q B. Research evolution on chemical component and physical character of foxtail millet[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008,23(3):199-203.
- [10] SALEH A S M, ZHANG Q, CHEN J, et al. Millet grains: nutritional quality, processing, and potential health benefits[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2013,12(3):281-295.
- [11] 章洁琼,刘辉,邹军,等.不同小米品种理化品质及感官品质分析与评价[J].中国粮油学报,2022,37(5):70-78.
ZHANG J Q, LIU H, ZOU J, et al. Analysis and evaluation of physical and chemical and sensory quality of different varieties of millet[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022,37(5):70-78.
- [12] 钱广涛,李祥羽,周静雯,等.三种不同颜色藜麦籽粒中氨基酸及其衍生物的代谢组学分析[J].植物生理学报,2021,57(11):2192-2202.
QIAN G T, LI X Y, ZHOU J W, et al. Metabonomic analysis of amino acids and derivatives in three types of quinoa grains with different colors[J]. Plant Physiology Journal, 2021, 57(11):2192-2202.
- [13] 雷梦林,刘霞,李欣,等.利用农艺性状研究山西小麦地方品种的遗传代表性[J].分子植物育种,2020,18(20):6853-6872.
LEI M L, LIU X, LI X, et al. The genetic representation of lo-

- cal wheat varieties in Shanxi Province was studied by agronomic characters[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(20): 6853-6872.
- [14] 李萌,秦慧彬,王宇楠,等. 基于农艺性状指标的山西高粱地方品种核心种质构建[J]. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 174-182.
LI M, QIN H B, WANG Y N, et al. A core collection of *Sorghum* landraces formed by taking use of agronomic traits in Shanxi Province[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(1): 174-182.
- [15] 李春辉,王天宇,黎裕. 基于地方品种的种质创新:现状 & 展望[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(6): 1372-1379.
LI C H, WANG T Y, LI Y. Germplasm innovation of landraces: current status and future prospect[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(6): 1372-1379.
- [16] 王海岗,温琪汾,乔治军,等. 山西谷子地方品种初选核心种质构建[J]. *农学学报*, 2019, 9(4): 26-31.
WANG H G, WEN Q F, QIAO Z J, et al. Core germplasm construction of foxtail millet Landrace in Shanxi[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(4): 26-31.
- [17] 田伯红. 谷子地方品种和育成品种的遗传多样性研究[J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(2): 224-228.
TIAN B H. Genetic diversity of Landrace and improved cultivars in foxtail millet[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(2): 224-228.
- [18] 解慧芳,牛静,邢璐,等. 117 份谷子核心种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(13): 76-81.
XIE H F, NIU J, XING L, et al. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of 117 core germplasm resources of foxtail millet[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(13): 76-81.
- [19] 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.
- [20] 刘思辰,曹晓宁,温琪汾,等. 山西谷子地方品种农艺性状和品质性状的综合评价[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(11): 2137-2148.
LIU S C, CAO X N, WEN Q F, et al. Comprehensive evaluation of agronomic traits and quality traits of foxtail millet Landrace in Shanxi[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(11): 2137-2148.
- [21] 陆平. 谷子种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社, 2006.
LU P. Descriptors and data standard for foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [22] 陈家敬,鞠乐,强学杰,等. 南阳地区 5 个谷子品种主要农艺性状比较分析[J]. *大麦与谷类科学*, 2018, 35(1): 30-32.
CHEN J J, JU L, QIANG X J, et al. A comparative analysis of the main agronomic traits of five millet varieties grown in Nanyang city[J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35(1): 30-32.
- [23] 吴立根,屈凌波. 谷子的营养功能特性与加工研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(15): 191-196.
WU L G, QU L B. A review on the resource and processing of the millet[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(15): 191-196.
- [24] 闫舟,郝利平,梁亚萍,等. 小米蛋白提取、测定以及 SDS-PAGE 电泳[J]. *食品科技*, 2018, 43(9): 227-232.
YAN Z, HAO L P, LIANG Y P, et al. Extraction, assay and SDS-PAGE electrophoresis of millet protein[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(9): 227-232.
- [25] 张婷,王根平,罗焱杰,等. 色差分析在优质小米选育中的应用[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(5): 901-908.
ZHANG T, WANG G P, LUO Y J, et al. Color difference analysis in the application of high quality foxtail millet breeding [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 901-908.
- [26] 张耀元,路阳,张彬,等. 谷子类胡萝卜素生物合成途径 SiL-CYB 基因与米色形成的关系[J]. *分子植物育种*, 2016, 14(6): 1341-1351.
ZHANG Y Y, LU Y, ZHANG B, et al. The relationship between the gene SiLCYB related to carotenoid synthesis and the colored formation of foxtail millet[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2016, 14(6): 1341-1351.
- [27] 陈慢慢,田翔,陈凌,等. 谷子重组自交系主要农艺性状和品质性状相关分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(1): 172-180.
CHEN M M, TIAN X, CHEN L, et al. Correlation analysis of key agronomic traits and food quality using a foxtail millet recombinant inbred lines[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(1): 172-180.
- [28] 杨延兵,张涵,王润丰,等. 谷子籽粒小米黄色素含量的测定[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(3): 121-125.
YANG Y B, ZHANG H, WANG R F, et al. Determination of yellow pigment content in foxtail millet[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(3): 121-125.
- [29] 杨延兵,陈二影,王润丰,等. 不同生态条件对小米黄色素含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(18): 3232-3241.
YANG Y B, CHEN E Y, WANG R F, et al. Yellow pigment contents in foxtail millet (*Setaria italica*) under diverse ecological conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(18): 3232-3241.