

谷子种质资源表型性状遗传多样性分析

赵雅杰¹ 温蕊¹ 贾祎明¹ 金晓蕾¹ 张永虎¹
张利俊² 张彪³ 张慧³ 于立霞⁴

(¹内蒙古自治区农牧业科学院, 010031, 内蒙古呼和浩特; ²凉城县科学技术事业发展中心, 013750, 内蒙古乌兰察布;
³清水河县农牧和科技局, 011600, 内蒙古呼和浩特; ⁴蒙草生态环境(集团)股份有限公司, 010070, 内蒙古呼和浩特)

摘要 对 197 份谷子种质资源的表型遗传多样性进行分析。结果表明, 8 个质量性状的遗传多样性指数 (H') 范围为 0.522~1.246, 不同品种间表现出不同程度的多样性; 12 个数量性状的变异系数范围为 7.89%~139.07%, 其中大于 20.00% 的性状有 4 个, 为单株穗重、单株粒重、穗粗和产量, H' 范围为 0.505~2.080, H' 较高 (>2.0) 的性状有 5 个, 为株高、主穗长、千粒重、抽穗一成熟日数和产量。197 份种质资源中综合得分大于 0.500 的种质有 21 个, 根据表型性状筛选出 10 份谷子优异种质, 为谷子亲本选择及新品种选育提供理论依据。

关键词 谷子; 种质资源; 表型性状; 遗传多样性

谷子 [*Setaria italica* (L.) Beauv.] 起源于我国, 是一种粮饲兼用、耐旱、耐瘠薄的禾本科作物^[1], 谷子抗旱耐瘠薄, 还有丰富的营养成分, 具有健脾胃和补益虚损等保健功效^[2], 是我国北方干旱、半干旱地区重要的特色杂粮作物。中国谷子种植面积常年维持在 200 万 hm^2 左右, 约占全球谷子种植面积的 80%, 随着农业种植结构的调整, 种植面积逐年增加, 年总产量在 350 万 t 左右^[3]。

种质资源是育种工作的物质基础, 描述和鉴定农艺性状是种质资源利用研究的重要方法。中国是谷子种质资源最多、研究最深入的国家, 目前保存的谷子种质资源有 27 000 余份, 约占世界谷子资源总量的 80%^[4]。遗传多样性主要指生物种族内基因发生的变化, 由基因突变、基因重组和染色体畸变造成, 遗传多样性决定了生物多样性。研究种质资源遗传多样性并深入开展特殊类群群体遗传学研究是认识谷子种质资源遗传分型、进行种质创新利用的有效途径^[5]。研究学者可以从作物种质资源的遗传多样性判断作物基因的稳定性、进化能力和环境适应能力等, 从而采取科学有效的保护措施来保护作物遗传资源及培育新品种^[6]。杨延兵等^[7]对不同生态区谷子品种进行表型鉴定和遗传分析, 为优异谷子品种培育及种质资源利用提供了依据。袁迪等^[8]研究表明,

200 个登记品种遗传多样性丰富, 具有很好的育种利用价值, 为深入认识谷子表型遗传多样性以及谷子的育种应用奠定了基础。本研究通过对 197 份种质资源的 20 个表型农艺性状进行描述和鉴定, 计算质量性状和数量性状的遗传多样性, 分析其相关性, 整体把握资源材料信息, 了解谷子品种的遗传基础, 为有效利用谷子种质资源进行亲本选择、种质创新及作物改良提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为内蒙古自治区农牧业科学院收集、选育的谷子种质资源 197 份 (表 1)。

1.2 试验方法

试验在内蒙古自治区农牧业科学院试验田进行, 采用顺序排列, 不设重复, 每份材料种植 4 行, 行长 4 m, 行距 40 cm。播种后记载出苗期、抽穗期和成熟期, 并计算生育期, 田间调查 8 个质量性状, 成熟期每份材料重复随机选 5 株, 调查株高、主茎长、主穗长、穗粗、单株穗重、单株粒重、单株粒数和千粒重等 12 个数量性状。性状调查依据《谷子种质资源描述规范和数据标准》^[9]。为便于统计, 对 8 个质量性状分别赋值 (表 2)。

作者简介: 赵雅杰, 主要从事谷子育种与栽培研究, E-mail: ZYJ19960916@163.com

张永虎为通信作者, 主要从事谷子育种与栽培研究, E-mail: zhangyonghu0815@126.com

基金项目: 内蒙古科技计划项目 (2021GG0375); 内蒙古农牧业创新基金项目 (2021CXJJN02); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-06-14.5-B11)

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-04-22; 网络出版日期: 2024-08-15

表 1 197 份谷子种质资源基本信息
Table 1 Basic information of 197 foxtail millet germplasm resources

编号 Number	种质名称 Germplasm name	选育单位/来源地 Breeding unit/origin	编号 Number	种质名称 Germplasm name	选育单位/来源地 Breeding unit/origin
1	矮 88	中国河南郑州	50	蒙谷 2 号[小香米（纺锤）×15K1206]	中国内蒙古呼和浩特
2	蒙草谷 1 号（181-10）	中国内蒙古赤峰	51	蒙红谷 1 号（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特
3	陇谷 13	中国甘肃兰州	52	蒙谷 3 号[小香米（纺锤）×创 1-38-16H]	中国内蒙古呼和浩特
4	大同 29	中国山西大同	53	蒙白米 1 号[黑米谷（朱砂谷）×金苗 K1]	中国内蒙古呼和浩特
5	峰红 4 号	中国内蒙古赤峰	54	L5023（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特
6	黄金苗	中国内蒙古赤峰	55	3-24[小香米（纺锤）×15K3528]	中国内蒙古呼和浩特
7	公矮 2 号	中国吉林长春	56	00020566	中国国家种质资源库
8	衡谷 20	中国河北衡水	57	峰红 3 号	中国内蒙古赤峰
9	豫谷 18	中国河南安阳	58	峰黑谷	中国内蒙古赤峰
10	龙谷 38	中国黑龙江哈尔滨	59	赤谷 5 号	中国内蒙古赤峰
11	山西红谷	中国山西	60	赤谷 16	中国内蒙古赤峰
12	长农 35	中国山西长治	61	冀谷 41	中国河北石家庄
13	晋谷 21	中国山西吕梁	62	2017M001	中国河北石家庄
14	金苗 K1	中国内蒙古赤峰	63	冀谷 35	中国河北石家庄
15	燕谷 18	中国辽宁朝阳	64	冀谷 36	中国河北石家庄
16	济谷 22	中国山东济南	65	冀谷 39	中国河北石家庄
17	九根齐	中国内蒙古鄂尔多斯	66	大同 27	中国山西大同
18	大白谷	中国内蒙古乌兰察布	67	大同 32	中国山西大同
19	赤草 6 号	中国内蒙古赤峰	68	大同 34	中国山西大同
20	朝谷 58	中国辽宁朝阳	69	大同 37	中国山西大同
21	红钙谷	中国内蒙古乌兰察布	70	晋谷 23	中国山西大同
22	冀谷 45	中国河北石家庄	71	晋谷 33	中国山西大同
23	九谷 23	中国吉林吉林	72	中谷 9 号	中国北京
24	中谷 2 号	中国北京	73	峰红 2 号	中国内蒙古赤峰
25	公谷 88	中国吉林长春	74	峰红 5 号	中国内蒙古赤峰
26	嫩选 18	中国黑龙江齐齐哈尔	75	赤优抗谷 1 号	中国内蒙古赤峰
27	8311	中国河北张家口	76	赤优抗谷 2 号	中国内蒙古赤峰
28	齐新谷 1 号	中国黑龙江齐齐哈尔	77	峰红谷	中国内蒙古赤峰
29	沁州黄	中国内蒙古呼和浩特	78	公矮 5 号	中国吉林长春
30	汾选 3 号	中国山西吕梁	79	赤谷 10 号	中国内蒙古赤峰
31	蒙黑谷 1 号（峰黑谷×20121500330）	中国内蒙古呼和浩特	80	衡谷 19	中国河北衡水
32	蒙谷 4 号（晋谷 21×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特	81	衡谷 21	中国河北衡水
33	L4033（长农 35×15K1420）	中国内蒙古呼和浩特	82	龙谷 25	中国黑龙江哈尔滨
34	L4035（长农 35×15K1422）	中国内蒙古呼和浩特	83	龙谷 29	中国黑龙江哈尔滨
35	蒙谷 5 号（豫谷 18×金苗 K1）	中国内蒙古呼和浩特	84	龙谷 31	中国黑龙江哈尔滨
36	蒙红谷 2 号（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特	85	龙谷 39	中国黑龙江哈尔滨
37	L5002（农家红谷×15K1206）	中国内蒙古呼和浩特	86	晋谷 34	中国山西太原
38	L5003（00020566×创 1-38-16H）	中国内蒙古呼和浩特	87	晋谷 36	中国山西太原
39	L5013（小香米×创 1-38-16H）	中国内蒙古呼和浩特	88	晋谷 52	中国山西太原
40	蒙红谷 3 号（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特	89	晋谷 59	中国山西太原
41	3-23（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特	90	晋谷 60	中国山西太原
42	L5021（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特	91	长农 36	中国山西长治
43	L5022（农家红谷×15K1214）	中国内蒙古呼和浩特	92	长农 38	中国山西长治
44	蒙谷 6 号（小香米×冀谷 35）	中国内蒙古呼和浩特	93	长农 40	中国山西长治
45	蒙谷 7 号（公矮 2 号×安 16h-8283）	中国内蒙古呼和浩特	94	长农 44	中国山西长治
46	3-14[小香米（纺锤）×安 13-5150]	中国内蒙古呼和浩特	95	晋谷 29	中国山西吕梁
47	蒙谷 1 号（18H1435）	中国内蒙古呼和浩特	96	糜子亮	中国辽宁铁岭
48	6-5 叶绿鞘紫	中国内蒙古呼和浩特	97	锦谷 5 号	中国辽宁锦州
49	公矮 2 号×安 16h-8283	中国内蒙古呼和浩特	98	延夏谷 1 号	中国陕西延安

续表 1 Table 1 (continued)

编号 Number	种质名称 Germplasm name	选育单位/来源地 Breeding unit/origin	编号 Number	种质名称 Germplasm name	选育单位/来源地 Breeding unit/origin
99	红粘谷	中国黑龙江黑河	149	冀谷 168	中国河北石家庄
100	毛爪子谷子	中国山东临沂	150	冀谷 46	中国河北石家庄
101	黄那糯	中国湖南湘西	151	嫩选 15	中国黑龙江齐齐哈尔
102	一窝蚕谷子	中国山东东营	152	赤优金苗 1 号	中国内蒙古赤峰
103	狗尾粟	中国广东惠州	153	金苗 K2	中国内蒙古赤峰
104	(Y8) 谷子	中国内蒙古兴安盟	154	长农 47	中国山西长治
105	黄壳狗尾粟 (糯粟)	中国海南海口	155	冀谷 38	中国河北石家庄
106	黔南农家种	中国贵州	156	冀早谷 1 号	中国河北石家庄
107	昭和糯	日本	157	赤谷 6	中国内蒙古赤峰
108	(Y9) 谷子	中国内蒙古兴安盟	158	冀谷 40	中国河北石家庄
109	本地谷子	中国内蒙古通辽	159	赤谷 17	中国内蒙古赤峰
110	大乌谷	中国河北张家口	160	晋谷 51 号	中国山西太原
111	小乌谷子	中国河北张家口	161	冀杂金苗 1 号	中国河北石家庄
112	吨谷	中国山西太原	162	冀杂金苗 2 号	中国河北石家庄
113	济谷 20	中国山东济南	163	九谷 25	中国吉林吉林
114	赤谷 6 号	中国内蒙古赤峰	164	承 13-1126	中国河北承德
115	毛毛谷	中国内蒙古赤峰	165	晋谷 44 号	中国山西吕梁
116	朝谷 14	中国辽宁朝阳	166	晋谷 40 号	中国山西吕梁
117	农 2	中国内蒙古鄂尔多斯	167	龙谷 26	中国黑龙江哈尔滨
118	赤谷 4 号	中国内蒙古赤峰	168	汾选 8 号	中国山西吕梁
119	A2	中国河北张家口	169	承 17-M922	中国河北承德
120	黄金谷	中国内蒙古赤峰	170	赤优金苗 4 号	中国内蒙古赤峰
121	济白米 1 号	中国山东济南	171	承 15-M328	中国河北承德
122	赤谷 7 号	中国内蒙古赤峰	172	赤 209-3	中国内蒙古赤峰
123	赤 121-31 (赤谷 16×金丰谷)	中国内蒙古赤峰	173	青珍珠	中国山西吕梁
124	大金苗	中国内蒙古赤峰	174	赤谷 K3	中国内蒙古赤峰
125	峰优谷 18	中国内蒙古赤峰	175	大和尚	中国内蒙古清水河
126	农 1	中国内蒙古阿拉善盟	176	陇绿谷	中国甘肃兰州
127	赤谷 27	中国内蒙古赤峰	177	丰谷 2 号	中国河北石家庄
128	赤 231-9	中国内蒙古赤峰	178	丹谷 2 号	中国甘肃兰州
129	朝谷 13	中国辽宁朝阳	179	绿野谷	中国内蒙古赤峰
130	陇谷 4 号	中国甘肃兰州	180	峰红 6 号	中国内蒙古赤峰
131	红粘谷	中国黑龙江黑河	181	赤谷 K1	中国内蒙古赤峰
132	大小穗红谷	中国山东济南	182	长谷 4 号	中国山西长治
133	鸟谷	中国山东济南	183	赤 89-4	中国内蒙古赤峰
134	坝 91-0628	中国河北张家口	184	赤谷 K2	中国内蒙古赤峰
135	龙选一号	中国黑龙江黑河	185	张家口 (早)	中国河北张家口
136	嫩选五号	中国黑龙江齐齐哈尔	186	赤 135-28	中国内蒙古赤峰
137	黄粘谷	中国黑龙江黑河	187	60 天还仓	中国内蒙古赤峰
138	红苗粘谷	中国辽宁抚顺	188	赤 84-49	中国内蒙古赤峰
139	黄粘谷	中国黑龙江黑河	189	长生 13	中国山西长治
140	昭农四号	中国内蒙古赤峰	190	峰红 7 号	中国内蒙古赤峰
141	延谷二号	中国陕西延安	191	赤 62-26	中国内蒙古赤峰
142	晋谷 6 号	中国山西吕梁	192	赤 79-19	中国内蒙古赤峰
143	张农 15 号	中国河北张家口	193	赤 264-7	中国内蒙古赤峰
144	簿地高	中国河北遵化	194	赤优金谷	中国陕西榆林
145	四留钱	中国河北唐山	195	赤 1509	中国内蒙古赤峰
146	黄毛谷	中国北京	196	赤 114-7	中国内蒙古赤峰
147	钻头白	中国北京	197	赤 205-25	中国内蒙古赤峰
148	黄苗大滑皮	中国北京			

表 2 形态多样性指标及赋值标准
Table 2 Morphological diversity indicators and evaluation criteria

编号 Number	性状 Characteristic	描述标准 Description standard
1	幼苗叶片颜色	1: 黄绿色, 2: 绿色, 3: 浅紫色, 4: 深紫色
2	幼苗叶鞘颜色	1: 绿色, 2: 浅紫色, 3: 中等紫色
3	株型	1: 上冲, 2: 半上冲, 3: 平展, 4: 下披
4	穗型	1: 圆锥, 2: 纺锤, 3: 圆筒, 4: 棍棒, 5: 鸭嘴, 6: 猫爪
5	刺毛长短	1: 极短, 3: 短, 5: 中, 7: 长
6	谷码松紧	1: 松, 2: 中, 3: 紧
7	籽粒颜色	1: 白色, 2: 黄色, 3: 红色, 4: 褐色, 5: 灰色 6: 黑色
8	颖果颜色	1: 白色, 2: 灰绿色, 3: 浅黄色, 4: 中等黄色, 5: 灰色

1.3 数据处理

利用 SPSS 23.0 计算 12 个数量性状的最小值、最大值、平均值、标准差、变异系数以及 8 个质量性状的分布频率; 采用 Shannon’s 遗传多样性指数

表 3 8 个质量性状的遗传多样性分析
Table 3 Genetic diversity analysis of eight quality traits

性状描述标准 Characteristic description standard	叶片颜色 Leaf color	幼苗叶鞘颜色 Larval color	株型 Plant type	穗型 Panicle type	刺毛长短 Length of seta	谷码松紧 Panicle compactness	籽粒颜色 Grain color	颖果颜色 Cargopsis color
1	0.142	0.838	0.299	0.142	0.264	0.112	0.259	0.046
2	0.832	0.066	0.604	0.599	—	0.619	0.563	—
3	0.025	0.096	0.056	0.208	0.421	0.269	0.091	0.401
4	—		0.041	0.036	—		0.041	0.528
5				0.005	0.239		0.030	0.025
6				0.010	—		0.015	
7					0.071			
H'	0.522	0.553	0.957	1.103	1.246	0.895	1.191	0.938

型、刺毛长短和籽粒颜色等质量性状的变异丰富。

2.2 谷子种质数量性状的变异及多样性分析

197 份谷子的 12 个数量性状的变异系数范围为 7.89%~139.07% (表 4), 其中大于 20.00% 的性状有 4 个, 依次为单株穗重、单株粒重、穗粗和产量; H' 范围为 0.505~2.080, H' > 2.0 的性状有 5 个, 分别为株高、主穗长、千粒重、抽穗一成熟日数和产量。

株高变幅为 77.60~203.40 cm, 极差为 125.80 cm, 晋谷 36 最高, 公谷 88 最低; 单株穗重变幅为 8.09~63.70 g, 极差为 55.61 g, 黄金苗最大, 龙选 1 号最

(H') 描述和评价遗传多样性指数, 其计算公式为: $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$ (P_i 为某性状第 i 个级别的出现频率)。对表型数据进行相关性主成分等分析。

2 结果与分析

2.1 谷子种质质量性状的多样性分析

197 份谷子种质 8 个质量性状的 H' 范围为 0.522~1.246 (表 3), 不同品种间存在较大差异, 相同性状在品种间也表现出不同程度的多样性。幼苗叶色以绿色为主 (0.832), 幼苗叶鞘颜色以绿色为主 (0.838), 株型以半上冲为主 (0.604), 穗型以纺锤形为主 (0.599), 刺毛长短以短毛为主 (0.421), 谷码松紧以中为主 (0.619), 籽粒颜色以黄色为主 (0.563), 颖果颜色以中等黄色为主 (0.528)。8 个质量性状的 H' 排序为刺毛长短 > 籽粒颜色 > 穗型 > 株型 > 颖果颜色 > 谷码松紧 > 幼苗叶鞘颜色 > 叶片颜色, 其中穗型、刺毛长短、籽粒颜色等表型性状的 H' 较高, 而叶片颜色和幼苗叶鞘颜色的 H' 较低, 表明供试材料的穗

小; 单株粒重变幅为 3.85~117.48 g, 极差为 113.63 g, 蒙谷 3 号最大, 黄那糯最小; 主穗长变幅为 13.57~36.47 cm, 极差为 22.90 cm, 陇谷 4 号最大, 大小穗红谷最小, 穗粗变幅为 0.98~31.19 cm, 极差为 30.21 cm, L5023 (农家红谷×15K1214) 最大, 晋谷 52 号最小; 千粒重变幅为 1.47~4.25 g, 极差 2.78 g, 陇谷 4 号最大, 黄那糯最小; 产量变幅为 340.68~11 043.42 kg/hm², 极差为 10 702.74 kg/hm², 黄苗大滑皮产量最高, 黄那糯产量最低。以上结果表明, 197 份谷子种质资源数量性状差异较大, 具有丰富的遗传多样性。

表 4 12 个数量性状的遗传多样性分析
Table 4 Genetic diversity analysis of 12 quantitative traits

性状 Characteristic	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 Standard deviation	极差 Range	变异系数 Coefficient of variation (%)	H'
株高 Plant height (cm)	148.28	77.60	203.40	27.66	125.80	18.65	2.050
单株穗重 Panicle weight per plant (g)	25.55	8.09	63.70	8.77	55.61	34.33	1.994
单株粒重 Grain weight per plant (g)	20.00	3.85	117.48	10.29	113.63	51.42	1.800
出谷率 Grain output (%)	75.45	21.65	91.83	11.63	70.18	15.41	1.765
主穗长 Main panicle length (cm)	24.14	13.57	36.47	4.21	22.90	17.42	2.080
穗粗 Panicle diameter (cm)	3.05	0.98	31.19	4.24	30.21	139.07	0.505
千粒重 1000-grain weight (g)	3.04	1.47	4.25	0.41	2.78	13.53	2.031
出苗—抽穗日数 Days of emergence-heading (d)	74.95	48.00	103.00	8.49	55.00	11.33	1.994
抽穗—成熟日数 Days of heading-ripening (d)	52.39	34.00	92.00	7.28	58.00	13.90	2.009
生育日数 Days of reproductive (d)	127.34	97.00	151.00	10.04	54.00	7.89	1.935
茎粗 Stem diameter (mm)	8.58	5.69	13.73	1.52	8.04	17.73	1.979
产量 Yield (kg/hm ²)	5701.88	340.68	11 043.42	2052.37	10 702.74	35.99	2.076

2.3 谷子种质性状相关性分析

由表 5 可知，株高与出谷率、茎粗呈极显著负相关，与穗粗、千粒重呈显著负相关；千粒重与单株穗重、单株粒重、出谷率、主穗长和穗粗呈极显著正相关关系；单株穗重与抽穗—成熟日数呈极显著正相关关系；产量与单株粒重、单株穗重、出谷

表 5 主要性状相关性分析
Table 5 Correlation analysis of main traits

性状 Characteristic	株高 Plant height	单株穗重 Panicle weight per plant	单株粒重 Grain weight per plant	出谷率 Grain output	主穗长 Main panicle length	穗粗 Panicle diameter	千粒重 1000-grain weight	出苗—抽穗日数 Days of emergence-heading	抽穗—成熟日数 Days of heading-ripening	生育日数 Days of reproductive	茎粗 Stem diameter	产量 Yield
株高 Plant height	1.000											
单株穗重 Panicle weight per plant	0.035	1.000										
单株粒重 Grain weight per plant	-0.125	0.706**	1.000									
出谷率 Grain output	-0.293**	0.170*	0.345**	1.000								
主穗长 Main panicle length	0.104	0.353**	0.322**	0.223**	1.000							
穗粗 Panicle diameter	-0.175*	0.105	0.064	0.001	0.107	1.000						
千粒重 1000-grain weight	-0.179*	0.282**	0.280**	0.345**	0.298**	0.198**	1.000					
出苗—抽穗日数 Days of emergence-heading	0.055	-0.038	-0.081	-0.304**	-0.141*	0.021	-0.186**	1.000				
抽穗—成熟日数 Days of heading-ripening	-0.130	0.190**	0.081	-0.036	0.038	0.201**	0.334**	-0.197**	1.000			
生育日数 Days of reproductive	-0.047	0.106	-0.010	-0.283**	-0.092	0.163*	0.085	0.703**	0.559**	1.000		
茎粗 Stem diameter	-0.207**	0.414**	0.361**	0.225**	0.201**	0.268**	0.166*	0.232**	0.080	0.254**	1.000	
产量 Yield	0.124	0.348**	0.356**	0.405**	0.117	0.075	0.112	-0.111	0.061	-0.050	0.135	1.000

率呈极显著正相关关系。

2.4 谷子种质性状主成分分析

对 197 份谷子种质资源的 20 个表型性状进行主成分分析（表 6），遵循主成分累计贡献率≥60%的原则，前 7 个主成分累计贡献率达 64.279%，包含了质量性状和数量性状的绝大部分信息，可作为谷子表型性状评价的综合指标。

由表 6 可知，第 1 主成分贡献率为 16.599%，单株穗重、单株粒重和出谷率特征向量绝对值较高；第 2 主成分贡献率为 12.336%，生育期、出苗—抽穗日数和抽穗—成熟日数特征向量绝对值较高；第 3 主成分贡献率为 9.208%，籽粒颜色、幼苗叶鞘颜色特征向量绝对值较高；第 4 主成分贡献率为 8.077%，株高特征向量绝对值较高；第 5 主成分贡

献率为 6.621%，刺毛长短特征向量绝对值较高；对值较高；第 7 主成分贡献率为 5.102%，颖果颜色特征向量绝对值较高。
第 6 主成分贡献率为 6.6337%，主穗长特征向量绝对值较高。

表 6 谷子种质资源主要农艺性状的主成分分析
Table 6 Principal component analysis of main agronomic traits of foxtail millet germplasm resources

性状 Characteristic	主成分 PCA						
	1	2	3	4	5	6	7
株高 Plant height	-0.317	-0.032	0.104	0.735	0.128	-0.120	-0.036
单株穗重 Panicle weight per plant	0.678	0.257	-0.056	0.430	0.039	-0.116	-0.151
单粒重 Grain weight per plant	0.742	0.086	-0.115	0.301	-0.059	-0.019	-0.002
出谷率 Grain output	0.655	-0.375	-0.055	-0.111	-0.199	0.336	0.142
主穗长 Main panicle length	0.536	-0.073	0.261	0.189	0.057	-0.498	0.033
穗粗 Panicle diameter	0.276	0.293	-0.058	-0.257	0.202	-0.041	-0.328
千粒重 1000-grain weight	0.566	0.139	0.380	-0.115	0.205	0.182	0.173
出苗—抽穗日数 Days of emergence-heading	-0.263	0.671	-0.345	0.037	-0.338	-0.185	0.244
抽穗—成熟日数 Days of heading-ripening	0.234	0.453	0.326	-0.190	0.593	0.270	-0.077
生育日数 Days of reproductive	-0.053	0.896	-0.055	-0.107	0.144	0.039	0.150
茎粗 Stem diameter	0.542	0.398	-0.238	-0.118	-0.314	-0.112	-0.276
产量 Yield	0.457	-0.079	-0.225	0.489	0.108	0.351	0.058
叶片颜色 Leaf color	-0.024	0.415	0.481	-0.096	-0.288	0.112	-0.233
幼苗叶鞘颜色 Larval color	-0.024	-0.090	0.668	0.153	-0.264	0.252	-0.100
株型 Plant type	0.489	-0.257	-0.244	-0.497	-0.240	-0.043	-0.059
穗型 Panicle type	-0.332	0.035	-0.299	0.031	0.339	-0.027	-0.464
刺毛长短 Length of seta	0.033	-0.351	-0.024	-0.265	0.417	-0.071	0.257
谷码松紧 Panicle compactness	-0.314	0.180	-0.083	0.106	-0.220	0.640	0.010
粒色 Grain color	-0.077	0.086	0.641	-0.085	-0.163	-0.323	0.116
颖果颜色 Cargopsis color	0.105	0.332	-0.121	0.041	0.080	-0.006	0.555
特征值 Eigenvalue	3.320	2.467	1.842	1.615	1.324	1.267	1.020
贡献率 Contribution rate (%)	16.599	12.336	9.208	8.077	6.621	6.337	5.102
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	16.599	28.935	38.143	46.220	52.840	59.177	64.279

由各主成分综合得分情况（表 7）可知，197 份种质资源综合得分大于 0.5000 的有 21 个，其中

表 7 197 份种质资源主成分分析综合得分
Table 7 Comprehensive scores of principal component analysis of 197 germplasm resources

编号 Number	综合得分 Composite score	排名 Ranking	编号 Number	综合得分 Composite score	排名 Ranking	编号 Number	综合得分 Composite score	排名 Ranking
1	-0.2408	147	16	-0.4578	174	31	0.2200	59
2	0.0083	101	17	0.5780	14	32	0.0461	90
3	0.6493	8	18	0.1077	77	33	0.2335	56
4	0.4589	29	19	0.4403	32	34	0.1737	69
5	0.0505	89	20	-0.1251	129	35	0.0258	99
6	0.5898	12	21	0.5439	17	36	0.1455	72
7	-0.3832	164	22	0.0636	86	37	-0.2683	153
8	-0.0330	111	23	0.1046	78	38	-0.3322	162
9	0.2635	55	24	-0.1277	131	39	-0.0468	114
10	-0.1570	134	25	-0.0240	110	40	0.5525	16
11	-0.2323	146	26	0.0512	88	41	0.7628	4
12	0.1356	74	27	0.4796	24	42	0.4176	35
13	0.4850	22	28	0.0417	91	43	0.6395	10
14	0.1256	76	29	0.6763	7	44	0.3233	44
15	-0.0037	104	30	0.4178	34	45	0.3950	38

续表 7 Table 7 (continued)

编号 Number	综合得分 Composite score	排名 Ranking	编号 Number	综合得分 Composite score	排名 Ranking	编号 Number	综合得分 Composite score	排名 Ranking
46	0.3226	45	97	-0.4020	170	148	-0.1991	139
47	0.4404	31	98	0.4829	23	149	0.1725	70
48	0.4730	25	99	-0.4312	171	150	0.0999	79
49	0.5560	15	100	-0.0858	120	151	-0.2311	145
50	0.2063	62	101	-1.1358	195	152	-0.2676	152
51	0.4681	26	102	-0.2486	149	153	-0.0967	121
52	0.8181	2	103	-0.5524	180	154	-0.0349	112
53	0.2059	63	104	-0.7040	186	155	-0.2755	155
54	0.5183	18	105	-0.7279	187	156	0.0281	97
55	0.3008	47	106	-0.9269	192	157	-0.0576	117
56	-0.3035	157	107	-0.7288	188	158	-0.0173	108
57	-0.2495	150	108	-0.3229	161	159	0.5160	19
58	0.0335	95	109	-0.5662	181	160	-0.0197	109
59	-0.1092	125	110	-0.2245	144	161	0.0353	93
60	0.1789	68	111	-0.1255	130	162	0.0921	81
61	-0.0548	116	112	-0.3762	163	163	-0.2581	151
62	0.2294	57	113	-0.4466	173	164	0.2038	65
63	-0.2821	156	114	-0.0171	107	165	0.4413	30
64	0.0261	98	115	0.0319	96	166	0.2216	58
65	-0.0537	115	116	-0.5845	182	167	0.4592	28
66	0.5137	20	117	0.0032	102	168	0.0844	84
67	0.7720	3	118	0.5963	11	169	-0.1140	126
68	0.6771	6	119	-1.1435	196	170	-0.1472	132
69	0.7157	5	120	0.0960	80	171	0.1582	71
70	0.4192	33	121	-0.4405	172	172	0.2880	49
71	-0.0158	105	122	0.3897	39	173	0.1914	66
72	-0.1769	137	123	-0.0646	118	174	-0.1201	128
73	0.1290	75	124	-0.4585	175	175	0.2794	51
74	0.0345	94	125	-0.3872	167	176	0.6481	9
75	-0.1886	138	126	-0.1194	127	177	0.3350	42
76	-0.3226	160	127	0.2811	50	178	0.3460	40
77	0.0745	85	128	-0.3853	166	179	0.4601	27
78	0.1835	67	129	-0.0166	106	180	0.3358	41
79	0.2761	52	130	0.8908	1	181	0.2155	61
80	-0.2028	141	131	-0.7607	190	182	0.5063	21
81	0.2722	53	132	-0.7433	189	183	-0.3187	159
82	0.0580	87	133	-0.2409	148	184	-0.5241	178
83	-0.0706	119	134	-0.6449	183	185	0.0373	92
84	-0.2187	143	135	-1.2998	197	186	-0.2118	142
85	-0.1002	122	136	-0.9980	193	187	-0.4780	176
86	0.3984	37	137	-0.1671	135	188	0.2184	60
87	0.5874	13	138	-0.5402	179	189	0.3993	36
88	-0.1765	136	139	-0.3165	158	190	-0.3921	169
89	0.2669	54	140	-0.2734	154	191	0.1402	73
90	0.2910	48	141	-0.1998	140	192	-0.1483	133
91	0.0185	100	142	-0.6875	185	193	-0.1036	124
92	0.0878	83	143	-0.6567	184	194	-0.0420	113
93	-0.0033	103	144	-0.3897	168	195	0.3215	46
94	0.2047	64	145	-1.0373	194	196	-0.1034	123
95	0.3289	43	146	-0.8203	191	197	0.0912	82
96	-0.3834	165	147	-0.4871	177			

陇谷 4 号、蒙谷 3 号、大同 32、3-23（农家红谷×15K1214）、大同 37、大同 34、沁州黄、陇谷 13、陇绿谷和 L5022（农家红谷×15K1214）综合排名居前 10 位。

3 讨论

丰富的种质资源涵盖了巨大的基因背景差异，种质资源遗传多样性分析是育种突破的关键，形态学标记是鉴定种质资源遗传变异最简单直观的方法，在遗传多样性研究及育种材料的选择中有着重要作用^[10]。了解谷子品种农艺性状特点及其之间的关联性，有助于育种目标性状的确定，再配以优良的栽培管理技术，有利于最大程度地发挥谷子品种内在生产潜力^[11]。李晓宁等^[12]对 15 份谷子品种的 9 个农艺性状进行变异分析，其变异幅度为 9.65%~131.25%，各农艺性状的变异系数从大到小依次为倒伏系数、单穗重、秆重、单株有效分蘖数、产量、穗长、株高、千粒重和生育期。本研究 197 份谷子的 12 个数量性状的变异系数范围为 7.89%~139.07%， H' 范围为 0.505~2.080，8 个质量性状的 H' 范围为 0.522~1.246，遗传多样性结果表明，多数质量性状 H' 低于数量性状，这与前人^[13]在谷子中的研究结果一致；较高的变异系数表明 197 份谷子的离散程度较高，表明谷子种质遗传基础较广，存在丰富的遗传变异^[14]，197 份材料在同一生态种植条件下，不同性状在不同材料间表现出不同程度的多样性，充分说明种质资源间的遗传多样性可以为谷子品种改良提供丰富的亲本材料。

在 12 个数量性状相关性分析中，各性状间部分显著或极显著，说明其紧密关联，遗传复杂性有待在育种实践中验证；单株穗重与单穗粒重相关性达 0.706，且均与产量呈显著正相关关系，说明可以通过田间选择单穗来有效提高产量，出苗—抽穗日数与生育期相关性为 0.703，且呈极显著相关，说明在出苗—抽穗阶段对谷子水分利用及生长速率的控制对改善谷子生育期具有重要意义。

本研究对 197 份谷子品种 20 个表型性状综合得分进行种质资源评价，该方法已在王海岗等^[15]

对山西谷子种质资源表型性状的综合评价中得到应用。综合评价结果显示，有 21 份谷子资源综合得分大于 0.5000，这与刘思辰等^[16]在山西谷子的性状综合研究中 F 值得分为 0.521 结果相近。本研究中排名前 10 的种质分别来自内蒙古、山西和甘肃等地，可作为本生态区特异种质在谷子新品种选育中加以利用。

4 结论

本研究对 197 份谷子种质资源的 20 个表型性状进行鉴定分析，得到陇谷 4 号、蒙谷 3 号、大同 32、大同 37、大同 34、沁州黄、陇谷 13 和陇绿谷等适宜本生态区种植的优良品种，筛选出的品种均在产量构成因子方面具有突出优势，适宜用于本生态区谷子品种改良，可作为谷子品质和特色育种的资源材料。

参考文献

- [1] 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. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 73-79.
- [2] 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. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 70-78.
- [3] 赵芳, 魏玮, 张晓磊, 等. 224 个谷子品种农艺性状聚类和相关性分析. 种子, 2022, 41(1): 74-83.
- [4] 纪军建, 付国庆, 寇淑君, 等. 谷子新品种 DUS 测试数量性状分级及遗传多样性研究. 种子, 2022, 41(9): 17-27.
- [5] 丁银灯, 胡相伟, 聂石辉, 等. 谷子种质资源表型及 SSR 遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(6): 1210-1221.
- [6] 任丽, 张余, 邓姗, 等. 基于形态标记的新育成辣椒品种特性分析. 植物遗传资源学报, 2023, 24(6): 1676-1689.
- [7] 杨延兵, 张会笛, 陈桂玲, 等. 不同生态区骨干谷子品种表型鉴定与遗传分析. 核农学报, 2021, 35(5): 1020-1029.
- [8] 袁迪, 智慧, 王海岗, 等. 我国谷子登记品种遗传多样性分析及综合评价. 作物杂志, 2024(4): 14-23.
- [9] 陆平. 谷子种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [10] 高杰, 封广才, 李晓荣, 等. 贵州不同地区高粱种质资源表型多样性与聚类分析. 作物杂志, 2020(6): 54-60.
- [11] 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. 大麦与谷类科学, 2018, 35(1): 30-32.
- [12] 李晓宁, 王昆鹏, 刘迎春, 等. 谷子主要农艺性状分析. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 26-30.
- [13] 丁银灯, 聂石辉, 王仙, 等. 谷子主要育成品种在新疆的遗传多样性研究. 植物遗传资源学报, 2018, 19(2): 232-242.
- [14] 吕伟, 韩俊梅, 任果香, 等. 山西芝麻种质资源遗传多样性分析. 作物杂志, 2019(5): 57-63.
- [15] 王海岗, 贾冠清, 智慧, 等. 谷子核心种质表型遗传多样性分析及综合评价. 作物学报, 2016, 42(1): 19-30.
- [16] 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. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2137-2148.

Analysis of Genetic Diversity of Phenotypic Traits of Foxtail Millet Germplasm Resources

Zhao Yajie¹, Wen Rui¹, Jia Yiming¹, Jin Xiaolei, Zhang Yonghu¹,
Zhang Lijun², Zhang Biao³, Zhang Hui³, Yu Lixia⁴

⁽¹⁾Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Huhhot 010031, Inner Mongolia, China;

⁽²⁾Liangcheng County Science and Technology Development Center, Ulanqab 013750, Inner Mongolia, China;

⁽³⁾Qingshuihe County Agriculture and Animal Husbandry and Science and Technology Bureau, Huhhot 011600, Inner Mongolia, China; ⁽⁴⁾Mengcao Ecological Environment (Group) Co., Ltd., Huhhot 010070, Inner Mongolia, China)

Abstract The phenotypic genetic diversity of 197 foxtail millet germplasm resources was analyzed. The results showed that the genetic diversity index (H') range of the eight quality traits was 0.522-1.246, and there were differences among different varieties. The variation coefficients of 12 quantitative traits ranged from 7.89% to 139.07%, among which four traits were greater than 20.00%, followed by panicle weight per plant, grain weight per plant, panicle diameter and yield. The diversity index ranged from 0.505 to 2.080. The five traits with a relatively high H' (>2.0) included plant height, main panicle length, 1000-grain weight, heading-ripening days and yield. Among 197 germplasm resources, 21 germplasms had a composite score greater than 0.5000, and ten germplasms of foxtail millet were selected as excellent germplasms according to phenotypic traits, which provided theoretical basis for the selection of parents and breeding of new varieties of foxtail millet.

Key words Foxtail millet; Germplasm resource; Phenotypic characteristic; Genetic diversity