

国内外高粱种质资源在江苏淮北地区的遗传多样性分析

赖上坤¹, 潘明泉¹, 朱莉², 刘敏轩³, 金倩¹, 刘晓飞¹, 陆平³, 王卫军¹

¹江苏省农业科学院宿迁农科所, 宿迁 223800; ²中国农业科学院生物技术研究所, 北京 100081;

³中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 针对江苏高粱产业缺乏本地适宜品种和优异种质资源问题, 本研究以 400 份来自国内外的高粱种质资源为试验材料, 利用 Shannon-weaver 多样性指数、相关分析、聚类分析和主成分分析, 对其在江苏淮北地区的遗传多样性进行了综合分析。结果表明, 供试高粱遗传多样性较丰富, 其中质量性状芽鞘色、幼苗叶色、主脉色、穗型、穗形、颖壳色、粒色、分蘖性和颖壳包被度的遗传多样性指数 H' 值分别为 1.0366、0.2235、0.6631、1.3980、0.9619、1.7641、1.7039、1.0631 和 0.9908; 而数量性状全生育期、株高、茎粗、穗长、穗柄长、穗粒重、千粒重、着壳率和角质率的 H' 值普遍高于质量性状, 分别为 2.048、1.925、2.047、1.982、2.053、2.031、2.069、1.437 和 1.927。相关分析结果表明, 株高与全生育期、穗长、穗柄长、穗粒重和着壳率呈极显著正相关, 与千粒重呈显著负相关; 穗粒重与全生育期及千粒重呈极显著正相关, 穗长与穗柄长和着壳率呈极显著正相关, 与千粒重呈极显著负相关。数量性状的聚类分析表明, 在欧式距离为 15 时, 供试高粱可以分为 3 大类。其中类群 I 植株高大, 穗粒重和千粒重较小, 可作为能源开发; 类群 II 穗长和穗柄长较长, 可从中筛选适合粮饲兼用型育种利用的资源; 类群 III 矮秆、大穗、早熟, 可作为粒用高粱材料创新及杂交育种的基础材料。数量性状的主成分分析结果显示, 4 个主成分因子对表型变异的累计贡献率达到 85.153%; 其中第 1 主成分方差贡献率达到了 33.209%, 载荷较高的性状有穗长和穗柄长; 第 2 主成分贡献率为 25.189%, 穗粒重载荷最高; 第 3 主成分贡献率为 15.427%, 千粒重载荷最高; 第 4 主成分贡献率为 11.328%, 载荷较高的性状有全生育期、株高、茎粗以及角质率。从供试高粱种质中, 筛选出 8 份全生育期较短、株高较矮、穗型偏散可供江苏地区育种利用的优良资源。

关键词: 高粱; 种质资源; 江苏; 遗传多样性

Genetic Diversity Analysis of Sorghum Germplasm Resources from Different Countries in Northern Jiangsu

LAI Shangkun¹, PAN Mingquan¹, ZHU Li², LIU Minxuan³, JIN Qian¹, LIU Xiaofei¹, LU Ping³, WANG Weijun¹

¹Institute of Suqian, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Suqian Jiangsu 223800; ²Biotechnology Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ³Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Regarding the shortage of locally suitable varieties and excellent sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) germplasm resources in Jiangsu's sorghum industry, the genetic variation level of 400 sorghum germplasm resources from local and global used as experimental materials was comprehensively analyzed in northern Jiangsu by using the Shannon-Weaver diversity index, correlation analysis, cluster analysis and principal component analysis. The results showed that these sorghum germplasm resources had rich genetic diversity. Among them, the genetic diversity indices (H' values) of the qualitative traits such as coleoptile color, leaf color of seedling, medium vein color, panicle type, panicle type, glume color, grain color, tillering and grain covering were 1.0366, 0.2235, 0.6631, 1.3980, 0.9619, 1.7641, 1.7039, 1.0631 and 0.9908, respectively. While, the H' values of quantitative traits such as period of duration, plant height, stem diameter, main panicle length, peduncle length, grain weight per spike, thousand-grain weight, glume seed percentage, and endosperm corneous were all relatively higher than those of the qualitative traits, which were 2.048, 1.925, 2.047, 1.982, 2.053, 2.031, 2.069, 1.437, and 1.927, respectively. The results of correlation analysis showed that the plant height was significantly positively correlated with the period of duration, panicle length, peduncle length, grain weight per spike, glume seed percentage, and significantly negatively correlated with thousand-grain weight. Grain weight per spike was significantly positively

收稿日期: 2024-08-18 网络出版日期:

第一作者研究方向为高粱种质资源评价与利用, E-mail: 20151603@jaas.ac.cn

通信作者: 王卫军, 研究方向为作物育种与种质资源创新, E-mail: sqnkynzw@126.com

刘敏轩, 研究方向为作物种质资源保护与利用, E-mail: liuminxuan@caas.cn

基金项目: 江苏省科技计划项目 (BE2023345); 宿迁市农业科技自主创新资金 (SQCX202001); 中国农业科学院科技创新工程

Foundation projects: Jiangsu Science and Technology Program (BE2023345), Suqian Agricultural Science and Technology Innovation Fund (SQCX202001), The Agricultural Science and Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences

correlated with period of duration and thousand-grain weight. Panicle length was significantly positively correlated with peduncle length and glume seed percentage, and significantly negatively correlated with thousand-grain weight. The cluster analysis of quantitative traits showed that these tested sorghum germplasms could be grouped into three clusters when the Euclidean distance was 15. Cluster I with the characteristics of high plant, smaller panicle and lower thousand-grain weight, can be developed for energy crops; Cluster II with the characteristics of longer panicle length and peduncle length, can be used as germplasm materials for dual-purpose grain and forage breeding; Cluster III with the characteristics of dwarf, early maturity and large panicle can be used as basic source for germplasm enhancement and breeding of grain sorghum. The principal component analysis of quantitative traits showed that the cumulative contribution rate of four principal component factors to phenotypic variation reached 85.153%, of which the contributing rate of the first principal component was 33.209%, mainly related to panicle length and peduncle length, while the contribution rate of the second principal component was 25.189%, mainly related to the grain weight per spike, and the third one was 15.427% contributed by the thousand-grain weight. The fourth was 11.328%, mainly contributed by period of duration, plant height, stem diameter and endosperm corneous. From the experimental germplasm, 8 excellent resources with shorter period of duration, shorter plant height and loose panicle type were selected, which could be used for sorghum breeding in Jiangsu province.

Key words: sorghum; germplasm resources; Jiangsu; genetic diversity

高粱 (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) 是世界第五大禾谷类作物, 具有抗旱、耐涝、耐盐碱、高光效等优点^[1], 在酿酒、食用、饲用、能源方面有广泛用途, 历史上曾作为主粮作物在我国广泛种植^[2], 1960-1970 年代还是北方解决粮食短缺的问题的重要作物^[3]。1980 年代以来, 随着农业科技的进步, 我国小麦、水稻等口粮作物产量大幅增加^[4], 种植业结构也随之快速调整, 高粱才逐步从食用谷物转变为酿造原料^[5]。近年来, 随着白酒行业的高质量转型, 高品质原粮成为白酒企业提高竞争力的重要发力方向^[6]。江苏是全国著名的白酒消费和生产大省, 拥有“洋河”“双沟”“今世缘”等知名品牌, 但江苏高粱产业却远远落后于国内其他高粱产区, 主要原因就是缺乏与本地气候相宜的品种^[7-8]。

种质资源是品种选育的物质基础^[9], 科学评价其遗传多样性和生态适应性对于品种改良意义重大^[10]。关于高粱种质资源遗传多样性的报道较多, 品质性状方面, 朱志华等^[11]在北京对国内 12 个省份的 532 份高粱资源蛋白、淀粉和单宁等品质性状进行了比较分析, 筛选出一批优质高粱资源。王自力等^[12]和高旭等^[13]在贵州分别对 152 份和 257 份高粱资源的酿造品质进行了鉴定, 筛选到一批适合贵州种植的优质酿造资源。地方资源方面, 何继红等^[14]、刘秀慧等^[15]、覃初贤等^[16]、吴国江等^[17]以及牛雪婧等^[18]分别对甘肃 128 份、浙江 52 份、广西 481 份、内蒙 176 份及河北 136 份本地高粱资源进行了表型鉴定和多样性分析, 发现不同省份地方高粱品种均具有较高的遗传多样性, 且存在明显的生态变异, 并筛选到部分适宜当地的优异资源。异地资源鉴定方面, 王黎明等^[19]在黑龙江对来自中国、美国及东欧的 173 份高粱资源进行了表型鉴定, 周瑜^[20]等在重庆对来自中国、美国和澳大利亚的 434 份高粱种质资源进行了鉴定分析, 发现不同来源高粱资源的全生育期、株高、穗长、每穗粒数和千粒重等性状在当地差异很大, 后者还筛选出 1 份特矮秆和 23 份矮秆资源。分子鉴定方面, 孙远涛等^[21]在四川以 SSR 引物解析了 45 份高粱资源的遗传多样性, 初步明确了供试高粱性状的亲缘关系。段国旗等^[22]以 237 份高粱自交系关联群体为材料, 筛选到株高关联基因 *SbPH11* 的两个功能性 SNP 位点。有关江苏高粱种质资源研究的报道较少, 李春宏等^[23]在江苏南部地区对 104 份本地资源进行了遗传多样性分析, 筛选出 9 份优异材料。张一中等^[24]在相同试验基地对 175 份资源进行了多样性分析, 筛选出 13 份耐穗发芽种质。而江苏淮北高粱主产区的大规模、广来源种质资源研究尚未见报道。

高粱表型受基因型和环境的共同影响, 相同种质资源在不同的生态区会有不同的遗传表现。正因为如此, 尽管我国登记保存的高粱资源有 22797 份^[6], 开展相关鉴定研究报道也很多, 但已被育种利用的数量极其有限。因此, 为了丰富我国高粱种质资源在不同生态区的鉴定数据, 有效利用种质资源丰富的遗传背景, 本研究在江苏淮北高粱主产区对来自 18 个国家的 400 份高粱种质资源进行了表型鉴定和遗传多样性分析, 并对优异资源开展了针对性筛选, 以期能为江苏高粱育种研究和产业发展提供理论依据和材料支持。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

供试材料共 400 份，全部来自国家作物种质库。参试种质中，98 份为国内高粱，其中华北 39 份：山西、河北、内蒙古分别为 19、14 和 6 份，东北 25 份：辽宁、黑龙江、吉林分别为 16、8 和 1 份，西北 7 份：甘肃、新疆和陕西分别为 4、2 和 1 份，西南 14 份：其中云南 11 份、四川 3 份，华中 6 份，湖北 4 份、湖南 2 份，华东 7 份全在山东；302 份来自亚洲、美洲、欧洲和大洋洲等高粱产区的 17 个国家，其中印度 170 份、美国 59 份、墨西哥 23 份、法国 21 份、日本 12 份、英国 3 份，西德、匈牙利、罗马尼亚各 2 份，澳大利亚、乍得、捷克、埃塞俄比亚、朝鲜、巴基斯坦、泰国和苏联各 1 份。资源相关信息见表 1。

表 1 400 份参试高粱种质资源的基本信息

Table 1 The basic information of 400 sorghum germplasm resources used in this study

编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin
1	119 高粱	中国辽宁	46	黄壳散	中国辽宁	91	饭高粱（景东）	中国云南
2	八叶齐	中国内蒙古	47	黑黄棒子	中国辽宁	92	黄红糯高粱（元谋）	中国云南
3	大黄壳	中国辽宁	48	散穗红壳	中国辽宁	93	黄壳黄米高粱（元谋）	中国云南
4	小粘棒	中国辽宁	49	老鸪登	中国黑龙江	94	散穗高粱（呈贡）	中国云南
5	平顶香	中国黑龙江	50	克恢 22 号	中国黑龙江	95	糯高粱（禄丰）	中国云南
6	白粘高粱	中国辽宁	51	二稀码	中国山东	96	糯高粱（嵩明）	中国云南
7	对粒	中国辽宁	52	打锣锤	中国山东	97	白高粱（吐鲁番）	中国新疆
8	老鸪登	中国黑龙江	53	黄萼	中国山东	98	高粱（沙湾）	中国新疆
9	米棒子	中国黑龙江	54	黑皮高粱	中国山东	99	Alpha	澳大利亚
10	珍珠白	中国内蒙古	55	紫壳子高粱	中国山东	100	Hybrid Sorghum S32	英国
11	歪脖张	中国辽宁	56	隔河偷	中国山东	101	Sorghum NK300A	英国
12	洋大粒	中国辽宁	57	遭烘萼高粱	中国山东	102	Hybor MV309	英国
13	黄罗伞	中国吉林	58	甘 6513	中国甘肃	103	KO2-Kass	乍得
14	跃进 4 号	中国辽宁	59	早熟黑格棒	中国甘肃	104	S.durrha	捷克
15	鸽子灰	中国内蒙古	60	黑壳高粱	中国甘肃	105	埃塞 13	埃塞俄比亚
16	瞎八石	中国辽宁	61	碎老汉	中国甘肃	106	Sg 1681	法国
17	二铺粒	中国山西	62	一把伞（翼城）	中国山西	107	Sg 1765	法国
18	二蛇眼红	中国河北	63	白高粱（阳高）	中国山西	108	Sg 1975	法国
19	小关东青	中国河北	64	灯笼红（忻州）	中国山西	109	Sg 1979	法国
20	小高粱	中国河北	65	紧穗高粱（稷山）	中国山西	110	Sg 3658	法国
21	小粒白高粱	中国河北	66	黄壳子高粱（永和）	中国山西	111	Sg 4106	法国
22	大中粘高粱	中国河北	67	黑 63027	中国黑龙江	112	Sg 4149	法国
23	大关东青	中国河北	68	贼不偷高粱（宁陕）	中国陕西	113	Sg 4155	法国
24	大蛇眼白	中国河北	69	黑暴糯高粱（广南）	中国云南	114	Sg 4194	法国
25	大蛇眼红	中国河北	70	小黑壳（哲盟）	中国内蒙古	115	Sg 4469	法国
26	平身白	中国河北	71	哲 38 恢	中国内蒙古	116	Sg 4516	法国
27	关东青	中国河北	72	低晋 5	中国山西	117	Sg 4527	法国
28	米高粱	中国河北	73	晋铁 2	中国山西	118	Sg 4550	法国
29	红壳白	中国河北	74	晋 5-0	中国山西	119	Sg 4815	法国
30	红高粱	中国河北	75	特紧 1	中国山西	120	Sg 4950	法国
31	紫码米青	中国河北	76	克恢 45	中国黑龙江	121	Sg 5007	法国
32	千斤红	中国山西	77	绥恢 16	中国黑龙江	122	Sg 5056	法国
33	圪塔穗	中国山西	78	红高粱	中国湖北	123	Sg 5092	法国
34	竹叶青	中国山西	79	铁高粱	中国湖北	124	Sg 5103	法国
35	纺穗高粱	中国山西	80	高粱	中国湖北	125	Sg 5122	法国
36	软茭子	中国山西	81	高粱	中国湖北	126	Sg 5151	法国
37	软茭子	中国山西	82	湘攸 22	中国湖南	127	Roce	西德
38	歪脖金茭子	中国山西	83	郑梁 8 号	中国湖南	128	Vespa	西德
39	离石黄	中国山西	84	粘高粱（巫溪）	中国四川	129	CKA (Male sterile)	匈牙利
40	黄高粱	中国山西	85	落籽红壳（西昌）	中国四川	130	Sumac	匈牙利
41	粘高粱	中国内蒙古	86	糯高粱（古蔺）	中国四川	131	A531	印度
42	大黑头	中国辽宁	87	丰谷高粱（西畴）	中国云南	132	ASR-2	印度
43	老姑座	中国辽宁	88	长脖子高粱（元谋）	中国云南	133	BR-307	印度
44	青壳高粱	中国辽宁	89	白高粱（文山）	中国云南	134	BR-319	印度
45	岫岩紫	中国辽宁	90	红高粱（开远）	中国云南	135	CSH9	印度

表 1 (续)

编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin
136	CSV-4	印度	181	IS-330 (B68)	印度	226	M-60387	印度
137	D-24089-81-K	印度	182	IS-413	印度	227	M-60391	印度
138	D-24149-81-K	印度	183	IS-416	印度	228	M-60394	印度
139	D-71246	印度	184	IS-474	印度	229	M-60395	印度
140	E20	印度	185	IS-620	印度	230	M-60419	印度
141	E77	印度	186	Is 633	印度	231	M-60440	印度
142	E90	印度	187	IS-634	印度	232	M-60443	印度
143	E92	印度	188	IS-859 (KD)	印度	233	M-60451	印度
144	E-302	印度	189	IS-1054 (M35)	印度	234	M-60452	印度
145	E-303	印度	190	IS-1082	印度	235	M-60465	印度
146	Framida	印度	191	IS-2122	印度	236	M-60750	印度
147	ICSH 138	印度	192	IS-2205	印度	237	M-60752	印度
148	ICSH 142	印度	193	IS-2312	印度	238	M-60806	印度
149	ICSH 159	印度	194	IS-2820	印度	239	M-60826	印度
150	ICSH 205	印度	195	IS-3161	印度	240	M-60830	印度
151	ICSH 228	印度	196	IS-3798	印度	241	M-60839	印度
152	ICSH 229	印度	197	IS-3977	印度	242	M-61683	印度
153	ICSH 230	印度	198	IS-18473 (CSV-3.370)	印度	243	M-62554	印度
154	ICSH 245	印度	199	Is 18947 (IS12610c)	印度	244	M-62572	印度
155	ICSH 281	印度	200	IS-18958 (IS	印度	245	M-62671	印度
156	ICSH 310	印度	201	IS-19579	印度	246	M-62676	印度
157	ICSH 434	印度	202	M-40354 (MR-807)	印度	247	M-62689	印度
158	ICSH 479	印度	203	M-40894 (MR-821)	印度	248	M-62766	印度
159	ICSH 574	印度	204	M-60025B	印度	249	M-63259	印度
160	ICSV-107	印度	205	M-60159	印度	250	M-63327	印度
161	ICSV-108	印度	206	M-60169	印度	251	M-63832	印度
162	ICSV-114	印度	207	M-60252	印度	252	M-66350	印度
163	ICSV-120	印度	208	M-60253	印度	253	M-66378	印度
164	ICSV-126	印度	209	M-60254	印度	254	M-66444	印度
165	ICSV-133	印度	210	M-60256	印度	255	M-66447	印度
166	ICSV-137	印度	211	M-60272 (SPV-472)	印度	256	M-66467	印度
167	ICSV-138	印度	212	M-60297	印度	257	M-66475	印度
168	ICSV-145	印度	213	M-60313	印度	258	M-66478	印度
169	ICSV-146	印度	214	M-60315	印度	259	M-66595	印度
170	ICSV-147	印度	215	M-60328	印度	260	M-66745	印度
171	ICSV-148	印度	216	M-60330	印度	261	M-66801	印度
172	ICSV-149	印度	217	M-60334	印度	262	M-66836	印度
173	ICSV-151	印度	218	M-60337	印度	263	M-66858	印度
174	ICSV-153	印度	219	M-60338	印度	264	M-66998	印度
175	ICSV-155	印度	220	M-60346	印度	265	M-67056	印度
176	IS-103	印度	221	M-60348	印度	266	M-67064	印度
177	IS-156	印度	222	M-60350	印度	267	M-67074	印度
178	IS-160	印度	223	M-60351	印度	268	M-67096	印度
179	IS-172	印度	224	M-60357	印度	269	M-67209	印度
180	IS-183	印度	225	M-60370	印度	270	M-67289	印度

表 1 (续)

编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin
271	M-67300	印度	316	IcScTv-10-1	墨西哥	361	pink kafer	美国
272	M-67323	印度	317	ICSCTV-11-1	墨西哥	362	R 46①	美国
273	M-67337	印度	318	ICSCTV-11-2	墨西哥	363	R-line (TAMBK-52)①	美国
274	M-67340	印度	319	ICSCTV-11-3	墨西哥	364	Ribbon cone georga	美国
275	M-67361	印度	320	IcSLV-8	墨西哥	365	Rice kafir	美国
276	M-67366	印度	321	India Synthetic-534-2-FC	墨西哥	366	Rio 265-270 (7514)	美国
277	M-67395	印度	322	M 35032 (Sc108-3×CS3541)	墨西哥	367	RTx-7000	美国
278	M-67408	印度	323	M-40075B	墨西哥	368	Sedan red Kafer #1103	美国
279	M-67426	印度	324	PN4061-2	墨西哥	369	Shallu #85	美国
280	M-67518	印度	325	PP-41	墨西哥	370	Tx-378A	美国
281	M-67750	印度	326	PP 290	墨西哥	371	Tx-378B	美国
282	M-67769	印度	327	P74A461×TEPBK-1-3-05-1	墨西哥	372	Tx-2721	美国
283	M-67781	印度	328	RTx 430-1	墨西哥	373	Tx-2727	美国
284	MR-811	印度	329	(SC110-14×RTx430)-19-3-1	墨西哥	374	Tx-2730	美国
285	MR-823	印度	330	SURENO	墨西哥	375	Tx-2731	美国
286	MR-829	印度	331	Swarnar	墨西哥	376	Tx-2736	美国
287	MR-832	印度	332	77CS276	墨西哥	377	Waxy sooner	美国
288	MR-840	印度	333	77CS284	墨西哥	378	Wectern black hull kafir	美国
289	MR-853	印度	334	79T2846 (LASON) 80T 5058	墨西哥	379	Wesken kafir #1117	美国
290	MR-859	印度	335	82CV 7816k	墨西哥	380	Westland kansas	美国
291	SPV 126	印度	336	BTx434	墨西哥	381	Westlank milo G.C #38296	美国
292	SPV 386	印度	337	S.L50	巴基斯坦	382	Hado	苏联
293	SPV 472	印度	338	Larba grasa	罗马尼亚	383	KSP7-7-22A	美国
294	SPV 475	印度	339	Pahhuu Qhmapbg Henponem	罗马尼亚	384	KSP7-7-22B	美国
295	Tx 3048A	印度	340	ku3218	泰国	385	9104A	美国
296	Tx 3048B	印度	341	Gsc-1757	美国	386	9104B	美国
297	Zera-Zera-1	印度	342	Hegari #750	美国	387	9105A	美国
298	0-1	印度	343	IS-1526c	美国	388	9105B	美国
299	0-5	印度	344	IS-2177c	美国	389	9108A	美国
300	168	印度	345	IS-3071C	美国	390	9108B	美国
301	CHAL WAXY SORGHUM	日本	346	IS-3620C	美国	391	9202A	美国
302	EARLY WHEATLAND B	日本	347	IS-3911c	美国	392	9202B	美国
303	EARLY HEGARL	日本	348	IS-4639C	美国	393	9701A	美国
304	KALO 421	日本	349	IS-5394C	美国	394	9701B	美国
305	MAYS AMBER	日本	350	IS-5892c	美国	395	95706A	美国
306	MOCKTAK	日本	351	IS-6439C	美国	396	95706B	美国
307	MOCTAC LOCAL	日本	352	IS-6440C	美国	397	9707A	美国
308	WHITE MARTIN B	日本	353	IS-6710C	美国	398	9707B	美国
309	木浦在来种	日本	354	IS-7254c	美国	399	9709A	美国
310	半月堂黍	日本	355	IS-7444C	美国	400	9709B	美国
311	光川在来种	日本	356	IS-7537C	美国			
312	黑色在来种	日本	357	IS-7541c	美国			
313	万景台矮高粱	朝鲜	358	IS-10477	美国			
314	ES 309	墨西哥	359	N 4610	美国			
315	IcScTV-9-1	墨西哥	360	N 6229	美国			

1.2 试验设计

田间试验于 2020-2021 年在江苏省农业科学院宿迁农科所泗阳基地 (33.83° N、118.67° E, 海拔 12.6 m) 实施, 该基地位于中国暖温带和亚热带的分界线上, 兼有南北气候特征, 光照充足, 雨量充沛, 无霜期较长, 四季分明, 年均气温 14.4°C, 年均日照 2216 小时。试验地为沙壤土, pH 值 7.2, 有机质含量 18.2 g/kg, 全氮 1.1 g/kg, 速效氮 89.2 mg/kg, 速效磷 24.7 mg/kg, 速效钾 87.3 mg/kg。试验设 3 次重复, 每小区 3 行, 行长 3 m, 行距 50 cm, 株距 20 cm。两年播种期均为 6 月 1 日, 20 天后间苗。播种前结合整地施 45% 缓释复合肥 (N : P₂O₅ : K₂O 为 15% : 15% : 15%) 600 kg/hm², 其他管理措施同大田生产。

1.3 测定内容

按照《高粱种质资源描述规范和数据标准》^[25], 分别选择三行区中间一行观察记载各品种芽鞘色、幼苗叶色、主脉色、穗型、穗形、颖壳色、粒色、分蘖性和颖壳包被度。成熟后田间测量各参试材料株高、茎粗、穗长和穗柄长, 记载成熟期并计算全生育期; 每份材料分别取 5 穗进行室内考种测定穗粒重、千粒重、着壳率和角质率, 以两年观测值进行统计分析并依此筛选优良种质。

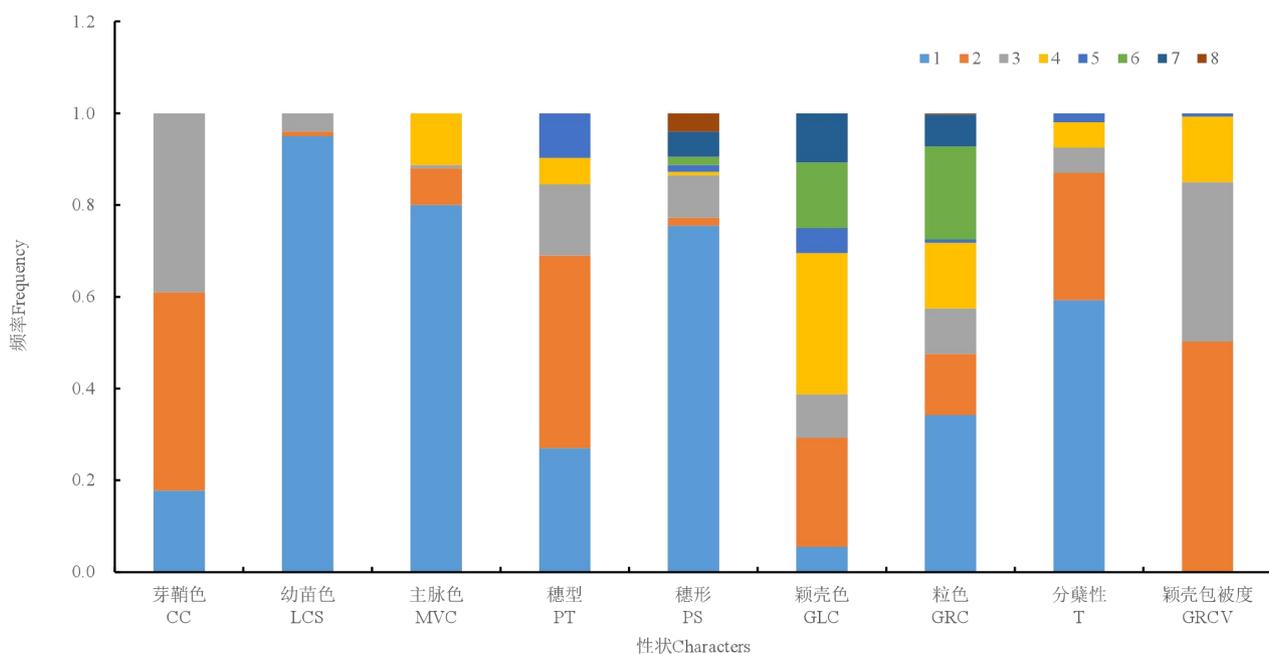
1.4 数据分析

统计分析的性状分为 2 类: 第 1 类是质量性状, 包括芽鞘色、幼苗叶色、主脉色、穗型、穗形、颖壳色、粒色、分蘖性和颖壳包被度, 按照《高粱种质资源描述规范和数据标准》^[25]对其分别赋值。第 2 类是数量性状, 包括全生育期、株高、茎粗、穗长、穗柄长、穗粒重、千粒重、着壳率和角质率, 使用 Excel 2019 分别计算其最大值、最小值、平均值、标准差、中位数和变异系数; 并根据平均数和标准差将所有性状数值分为 10 级, 从 $X_i < (x - 2s)$ 到 $X_i \geq (x + 2s)$, 每 0.5 s 为 1 级, 每一组的相对频率用于计算 Shannon-weaver 遗传多样性指数 H' ^[26], 计算公式为: $H' = -\sum P_i \ln P_i$, 式中 P_i 为某一性状第 i 级别内材料份数占总份数的百分比, \ln 为自然对数^[27]。利用 Origin 2021 软件对 9 个数量性状进行聚类分析^[28], 同时用 SPSS 22.0 进行相关分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 质量性状的遗传多样性分析

400 份高粱资源质量性状的变异情况如图 1 和表 2 所示。由图 1 可知, 参试种质资源变异较为丰富, 共有 48 个类型。其中, 芽鞘色的三种颜色分布较为均匀; 幼苗叶色几乎全是绿色, 红色和紫色极少; 主脉色则以白色为主, 绿色和浅黄次之, 黄色极少; 穗型以中紧和紧型为主, 散穗较少; 穗形多为纺锤形, 其余形状均较少; 颖壳色类型较为丰富且分布较均匀; 粒色变异也比较丰富, 以白色最多, 红色和黑色最少; 大部分资源分蘖性较弱, 且颖壳包被度较低。由表 2 可知, 供试高粱种质质量性状遗传多样性指数 H' 平均值为 1.0895, 整体不高, 但每个性状各变异类型分布不均匀, 其中穗型、颖壳色和粒色 H' 较高, 分别为 1.3980、1.7641 和 1.7039, 其余性状芽鞘色、幼苗叶色、主脉色、穗形、颖壳包被度和分蘖性的 H' 略低, 分别为 1.0366、0.2235、0.6631、0.9619、1.0631 和 0.9908。



芽鞘色: 1: 白, 2: 绿, 3: 紫; 幼苗叶色: 1: 绿, 2: 红, 3: 紫; 主脉色: 1: 白, 2: 浅黄, 3: 黄, 4: 绿; 穗型: 1: 紧, 2: 中紧, 3: 中散, 4: 侧散, 5: 周散; 穗形: 1: 纺锤形, 2: 牛心形, 3: 圆筒形, 4: 棒形, 5: 伞形; 颖壳色: 1: 白, 2: 黄, 3: 灰, 4: 红, 5: 褐, 6: 紫, 7: 黑; 粒色: 1: 白, 2: 灰白, 3: 浅黄, 4: 黄, 5: 橙, 6: 红, 7: 褐, 8: 黑; 分蘖性: 1: 无, 2: 弱, 3: 中, 4: 强, 5: 很强; 颖壳包被度: 1: 0.00, 2: 0.25, 3: 0.50, 4: 0.75, 5: 1.00; 下同

CC: Coleoptile color, 1: White, 2: Green, 3: Purple; LCS: Leaf color of seedling, 1: Green, 2: Red, 3: Purple; MVC: Medium vein color, 1: White, 2: Light yellow, 3: Yellow, 4: Green; PT: Panicle type, 1: Compact, 2: Semi-compact, 3: Semi-loose, 4: Side drooping, 5: Spreading drooping; PS: Panicle shape: 1: Fusiform, 2: Cordate, 3: Cylindrical, 4: Clavate, 5: Umbelliform; GLC: Glume color, 1: White, 2: Yellow, 3: Grey, 4: Red, 5: Brown, 6: Purple, 7: Black; GRC: Grain color: 1: White, 2: Grey-white, 3: Light yellow, 4: Yellow, 5: Orange, 6: Red, 7: Brown, 8: Black; T: Tillering: 1: None, 2: Weak, 3: Medium, 4: Strong, 5: Very strong; GRCV: Grain covering: 1: Uncovered, 2: Covered1/4, 3: Covered1/2, 4: Covered3/4, 5: Covered. The same as below

图 1 400 份参试高粱种质资源质量性状不同类型的频率分布
Fig. 1 Frequency distribution of qualitative traits of 400 sorghum germplasm resources

表 2 400 份参试高粱种质资源质量性状多样性指数

Table 2 Diversity index of qualitative traits of 400 tested sorghum germplasm resources

质量性状 Qualitative traits	代码	数量分布 Quantity distribution								多样性指数 H'
		1	2	3	4	5	6	7	8	
芽鞘色 CC	类型	白	绿	紫						1.0366
	数量	71	173	156						
幼苗叶色 LCS	类型	绿	红	紫						0.2235
	数量	380	4	16						
主脉色 MCV	类型	白	浅黄	黄	绿					0.6631
	数量	320	32	3	45					
穗型 PT	类型	紧	中紧	中散	侧散	周散				1.3980
	数量	108	168	62	39					
穗形 PS	类型	纺锤	牛心	圆筒	棒	杯	球	伞	帚	0.9619
	数量	302	7	37	3	6	7	22	16	
颖壳色 GLC	类型	白	黄	灰	红	褐	紫	黑		1.7641
	数量	22	95	38	123	22	57	43		
粒色 GRC	类型	白	灰白	浅黄	黄	橙	红	褐	黑	1.7039
	数量	137	53	40	57	3	81	28	1	
分蘖性 T	类型	无	弱	中	强	很强				1.0631
	数量	237	111	22	22	8				
颖壳包被度 GRCV	类型	裸露	包被 1/4	包被 1/2	包被 3/4	全包被				0.9908
	数量	0	201	139	57	3				

2.2 数量性状的遗传多样性分析

参试种质资源 9 个数量性状多样性分析结果如表 3 所示。由表可知, 9 个数量性状的变异系数在 8.85%-136.40%之间, 平均值为 40.01%, 其中变异系数最大的 3 个性状依次是着壳率、穗粒重和角质率, 表明这 3 个性状变异幅度很大, 而变异系数较小的为全生育期, 说明这些资源大部分可以在江苏地区正常生长。进一步分析发现, 9 个数量性状的遗传多样性指数 H' 在 1.4375-2.0693 之间, 平均值为 1.9467, 其中生

育期、株高、茎粗、穗长、穗柄长、穗粒重、千粒重、着壳率和角质率分别为 2.048、1.925、2.047、1.982、2.053、2.031、2.069、1.437 和 1.927，除着壳率以外，其余数量性状的 H' 均达到 1.9000 以上，说明 400 份高粱种质资源数量性状在江苏地区的表型变异较大，遗传背景丰富。

全生育期是种质资源育种利用的重要指标。400 份供试资源中，全生育期在 100 d 以下的特早熟资源有 4 份，分别是来自印度的 IS-160、IS-416、E-302 和来自墨西哥的 ES 309；在 101-115 d 之间的早熟材料有 70 份；在 116-130 d 之间的中熟材料有 194 份；在 131-145 d 之间的晚熟材料有 122 份；145 d 以上的特晚熟材料有 10 份，其中来自印度的 A531 全生育期长达 173 d。由于江苏地区种植制度为小麦-高粱轮作为主，为保证小麦产量，高粱全生育期不宜超过 130 d，供试资源中有 268 份可以在江苏淮北地区正常成熟。

株高是高粱最重要的表型性状之一，与生物量直接相关。400 份供试资源间的株高差异很大，变异类型非常丰富。其中，株高小于 100.00 cm 的特矮秆资源有 13 份，101.00-150.00 cm 之间的矮秆资源有 21 份，151.00-200.00 cm 之间的中等株高资源有 53 份，分别占全部资源的 3.25%、5.25% 和 13.25%；而株高大于 300.00 cm 的超高资源有 91 份，占全部资源的 22.75%。丰富的株高变异类型可为江苏地区不同用途高粱育种提供丰富的遗传来源。

茎粗与植株抗倒能力紧密相关，不同高粱资源间茎粗差异很大，但都在 1.00 cm 以上，其中 1.50 cm 以上的资源占全部资源的 45.50%。穗长是高粱最重要的表型性状之一，400 份供试资源间穗长差异也很大，其中来自印度的 IS-2312 只有 9.20 cm，而来自我国山西的软茭子长达 79.50 cm。穗柄长影响着高粱机械收获质量，400 份高粱资源的穗柄长在 11.10-78.30 cm 之间，主要集中在 20.01-50.00 cm，占全部材料的 79.50%。供试资源间的单穗粒重差异也非常大，其中最小的仅 2.60 g，而最大的高达 111.00 g，单穗粒重分布在 20.10-80.00 g 之间的材料较多，占全部材料的 73.00%。千粒重反映高粱籽粒库容和灌浆情况，供试资源千粒重变幅较大，小于 10.00 g 的占 12.75%，大于 35.00 g 的占 9.00%，大部分集中在 20.01-34.99 g 之间。着壳率和角质率与高粱用途息息相关，供试资源着壳率和角质率变幅均较大，说明其中含有各种用途的个体材料。

统计分析表明，400 份高粱种质资源在江苏淮北地区表现出较强的适应性和较大的差异性，具有丰富的遗传多样性。同时，本研究根据江苏地区高温高湿气候特点和一年两熟种植制度需要，筛选出全生育期较短、株高较矮、穗型偏散的 8 份优异资源（表 4，图 2），可为江苏高粱育种研究和产业发展提供材料和技术支持。

表 3 400 份参试高粱种质资源数量性状的主要参数

Table 3 Main parameters of quantitative traits of 400 tested sorghum germplasm resources

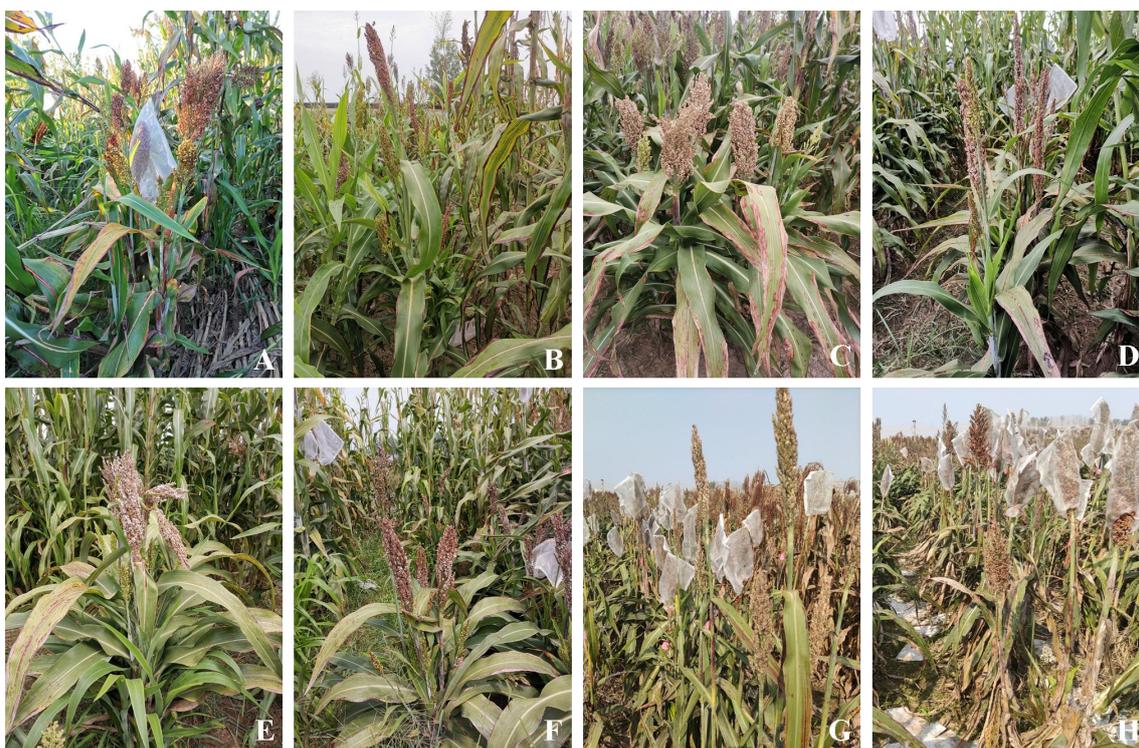
性状 Character	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值±标准差 Mean±SD	中位数 Median	变异系数(%) CV	遗传多样性指数 H'
全生育期 (d) GD	173.00	87.00	126.00±11.2	125.50	8.85	2.0479
株高 (cm) PH	447.00	83.00	247.20±70	245.00	28.31	1.9254
茎粗 (cm) SD	2.20	1.00	1.50±0.3	1.49	18.39	2.0472
穗长 (cm) MPL	79.50	9.20	26.50±6.6	26.00	24.98	1.9822
穗柄长 (cm) PL	78.30	11.10	41.70±9.9	41.45	23.79	2.0531
穗粒重 (g) KWP	111.00	2.60	41.40±22.4	41.00	54.18	2.0314
千粒重 (g) TGW	45.60	9.20	26.40±6.2	25.95	23.33	2.0693
着壳率 (%) GSP	100.00	0.20	14.40±19.7	8.00	136.33	1.4375
角质率 (%) EC	95.00	0.50	63.00±26.4	70.00	41.93	1.9265

GD: Period of duration; PH: Plant height; SD: Stem diameter; MPL: Main panicle length; PL: Peduncle length; GWPS: Grain weight per spike; TGW: thousand-grain weight; GSP: Glume seed percentage; EC: Endosperm corneous. The same as below

表 4 筛选到的优异高粱种质资源主要参数

Table 4 Main parameters of selected elite sorghum germplasm resources

编号 No.	品种名称 Name	来源地 Origin	穗型 PT	穗形 PS	粒色 GRC	全生育期 (d) GD	株高 (cm) PH	茎粗 (cm) SD	穗长 (cm) MPL	穗柄长 (cm) PL	穗粒重 (g) GWPS	千粒重 (g) TGW	着壳率 (%) GSP
2	八叶齐	中国内蒙古	中散	牛心	红	107	160	1.4	20.0	31.8	50.0	28.0	15.40
302	EARLYHEATLANDB	日本	中散	纺锤	红	116	174	1.15	25.8	42.2	28.4	21.7	21.00
357	IS-7541c	美国	周散	纺锤	白	115	98	1.62	33.8	52.8	12.9	27.8	16.00
362	R 46①	美国	中散	纺锤	白	119	101	1.02	28.2	47.4	6.5	20.3	2.00
375	Tx-2731	美国	中散	纺锤	灰白	111	113	1.78	31.1	51.6	16.0	27.6	2.30
380	Westland kansas	美国	中散	纺锤	红	119	95	1.79	26.3	41.6	11.6	25.2	24.70
383	KSP7-7-22A	美国	中散	杯	红	116	98	1.88	24.6	37.3	46.3	26.0	2.00
384	KSP7-7-22B	美国	中散	杯	红	116	98	1.88	24.6	37.3	46.3	26.0	2.00



A: No.2; B: No.302; C: No.357; D: No.362; E: No.375; F: No.380; G: No.383; H: No.384

图 2 筛选到的优异高粱种质资源照片

Fig. 2 Photos of selected elite sorghum germplasm resources

2.3 基于数量性状的相关分析

对 400 份供试高粱种质资源 9 个数量性状的相关分析结果表明，供试资源株高与全生育期、穗长、穗柄长、穗粒重和着壳率均存在不同程度的正相关且均达极显著水平，而与千粒重则呈显著负相关。穗粒重与全生育期及千粒重呈极显著正相关。穗长与穗柄长和着壳率呈极显著正相关，而与千粒重呈极显著负相关（表 5）。说明供试高粱各数量性状间存在紧密相关性，育种利用中应充分考虑相关性状的连锁关系。

表 5 400 份参试高粱种质资源数量性状的主要参数

Table 5 Main parameters of quantitative traits of 400 tested sorghum germplasm resources

性状 Traits	全生育期 GD	株高 PH	茎粗 SD	穗长 MPL	穗柄长 PL	穗粒重 GWPS	千粒重 TGW	着壳率 GSP	角质率 EC
全生育期 GD	1.000								
株高 PH	0.195**	1.000							
茎粗 SD	0.007	0.031	1.000						
穗长 MPL	-0.050	0.199**	-0.014	1.000					
穗柄长 PL	-0.030	0.229**	-0.098	0.785**	1.000				
穗粒重 GWPS	0.323**	0.189**	0.040	0.065	0.030	1.000			
千粒重 TGW	0.057	-0.109*	0.043	-0.149**	-0.129**	0.225**	1.000		
着壳率 GSP	-0.021	0.248**	-0.115	0.180**	0.199**	-0.063	-0.129**	1.000	

**表示在 1%水平差异极显著, *表示在 5%水平差异显著

** Indicates extremely significant differences at 1% level and * indicates significant differences at 5% level

2.4 基于数量性状的聚类分析

对参试种质资源数量性状的聚类分析结果如图 3 和表 6 所示。在欧氏距离为 15 时，供试高粱种质资源被分为 3 大类，其中类群 I 共 135 份资源，该类群株高最高且穗柄长最长，而穗粒重和千粒重最小，可作为能源材料开发。类群 II 共 175 份资源，该类株高中等，穗长和穗柄长较短，穗粒重较高且着壳率较低，可从该类群中筛选株高较高且穗粒重较重的材料用于粮饲兼用型育种，也可筛选部分矮秆大穗材料用于粒用高粱开发。类群 III 共 90 份资源，该类群大部分资源具有矮秆、早熟、大穗等特点，是粒用高粱的优异种质，可作为酿酒高粱新种质创制和新品种选育的基础材料。从来源来看，类群 I 中的资源 72.59% 来自中国，我国高粱主产区的 98 份农家品种全部在此类群，这些资源的特点是株高较高、穗型较大，以散穗为主；另外还有来自法国、英国、埃塞俄比亚等欧洲和非洲的资源分在此类群。类群 II 的资源全部来自印度和日本，分别占 94.29% 和 5.71%，这些资源绝大部分为人工创制的栽培品种，属于亚洲栽培种的典型代表。类群 III 主要来自美国和墨西哥，占 92.22%，是北美栽培种的典型代表；所有国外引进的不育系、保持系和特矮秆材料均被分在此类群。

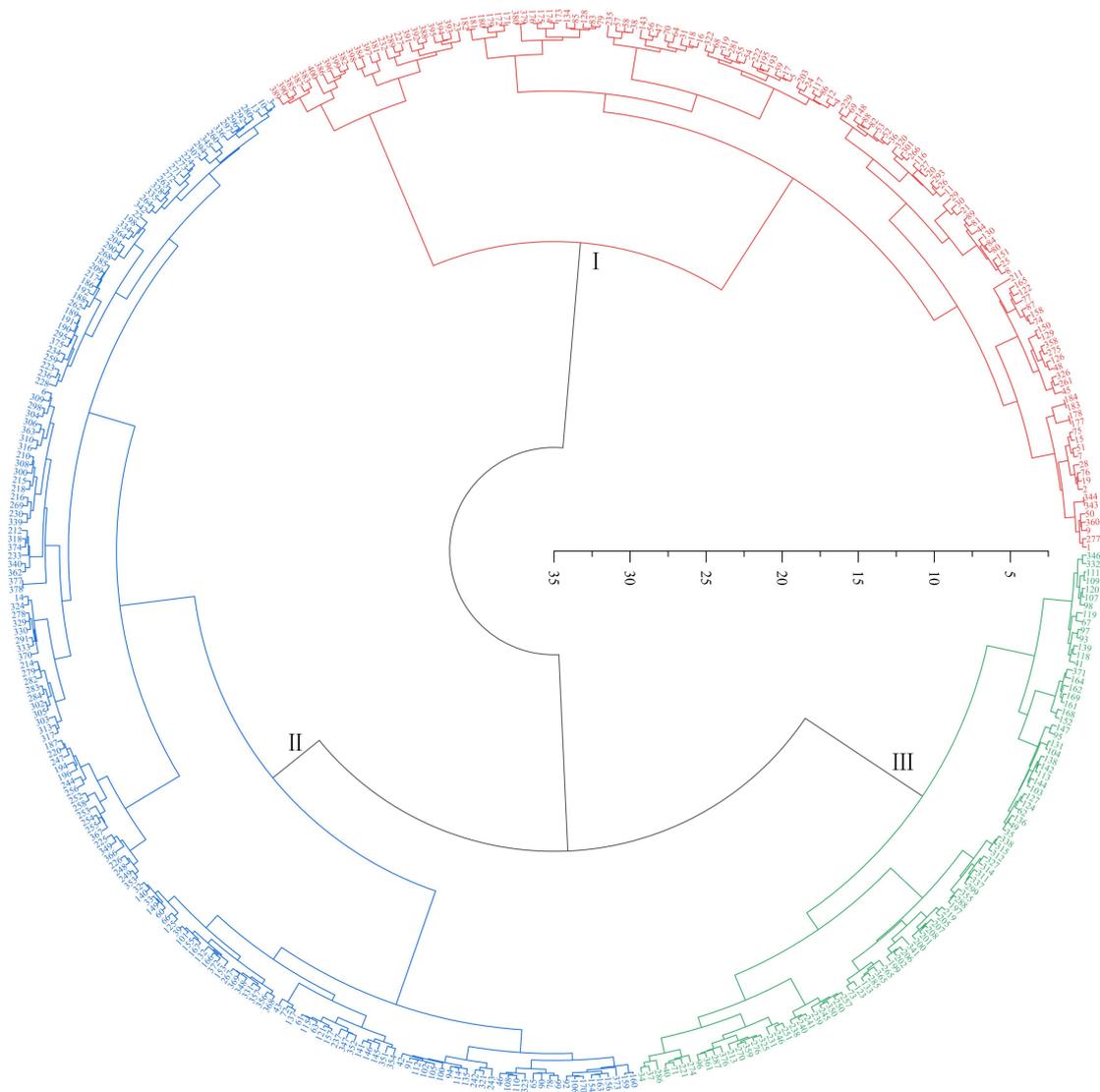


图 3 基于 400 份高粱资源 9 个数量性状的聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of 9 agronomic traits based on 400 sorghum germplasm resources

表 6 400 份参试高粱种质资源数量性状的主要参数

Table 6 Main parameters of quantitative traits of 400 tested sorghum germplasm resources

性状 Traits	项目 Item	种质类群 Germplasms clusters		
		I	II	III
	资源数	135	175	90
全生育期 (d) GD	平均值	120.36	128.52	123.49
	变异系数 (%)	10.80	9.22	7.55
株高 (cm) PH	平均值	291.16	248.42	176.46
	变异系数 (%)	14.73	18.84	38.14
茎粗 (cm) SD	平均值	1.49	1.49	1.51
	变异系数 (%)	19.63	19.02	18.54
穗长 (cm) MPL	平均值	31.33	25.59	25.36
	变异系数 (%)	26.01	19.79	19.68
穗柄长 (cm) PL	平均值	50.69	40.51	40.03
	变异系数 (%)	27.26	21.34	21.53
穗粒重 (g) GWPS	平均值	20.38	42.22	30.99
	变异系数 (%)	69.84	50.04	61.82
千粒重 (g) TGW	平均值	24.96	27.88	25.64
	变异系数 (%)	24.95	22.97	25.33
着壳率 (%) GSP	平均值	20.35	11.15	12.71
	变异系数 (%)	70.24	112.60	137.09
角质率 (%) EC	平均值	73.16	64.37	67.81
	变异系数 (%)	33.42	40.61	36.01

2.5 基于数量性状的主成分分析

供试高粱资源数量性状的主成分分析结果如表 7 所示。根据特征值和方差贡献率提取到特征值大于 1.000 的主成分 4 个。第 1 主成分的特征值为 2.089，方差贡献率达 33.209%，其中穗长和穗柄长载荷量最高，说明其主要反映穗部性状因子。第 2 主成分的特征值为 1.637，方差贡献率达 25.189%，其中穗粒重载荷量最高，说明其主要反映籽粒产量因子。第 3 主成分的特征值为 1.118，方差贡献率为 15.427%，其中千粒重载荷量较高，说明其主要反映籽粒灌浆和结实方面信息。第 4 主成分的特征值为 1.020，方差贡献率为 11.328%，其中全生育期、株高、茎粗以及角质率载荷量较高，说明第 4 主成分主要反映生物量和籽粒品质方面信息。这 4 个主成分的遗传贡献率累计达到了 85.153%，说明其可以代表 400 份高粱种质资源 9 个数量性状的大部分遗传信息。

表 7 400 份高粱种质资源数量性状的主成分分析

Table 7 The principal components analysis of quantitative traits of 400 tested sorghum germplasm resources

性状 Traits	主成份 Principal components			
	1	2	3	4
全生育期 GD	-0.0097	0.5930	-0.0119	0.5450
株高 PH	0.4648	0.4333	-0.3054	0.3546
茎粗 SD	-0.1428	0.1189	0.3606	0.3793
穗长 MPL	0.8551	0.0244	0.3431	-0.1632
穗柄长 PL	0.8763	-0.0057	0.3126	-0.1317
穗粒重 GWPS	-0.0047	0.8386	0.1455	-0.1697
千粒重 TGW	-0.3366	0.3154	0.4451	-0.2627
着壳率 GSP	0.4562	0.0215	-0.6078	-0.0831
角质率 EC	0.1782	-0.5288	0.3014	0.5516
初始特征值 Original eigenvalue	2.089	1.637	1.118	1.020
方差贡献率 (%) Variance contribution rate	33.209	25.189	15.427	11.328
累计贡献率 (%) Cumulative variance contribution rate	33.209	58.398	73.824	85.153

3 讨论

种业是农业的“芯片”，种质资源则是作物品种培育和改良最核心的遗传资源，科学利用种质资源是进行高效育种的关键基础^[29]，而鉴定评价和深入发掘优异种质材料是种质资源利用的基本前提^[30]。江苏是我国白酒酿造大省，高粱需求量巨大，却是我国高粱研究的洼地。为促进江苏高粱产业发展和种业创新，同时丰富我国高粱种质资源在不同生态区的鉴定数据，本研究从国家作物种质库引进 400 份来自国内外的高粱种质资源，并在江苏淮北生态气候条件下进行了为期两年的表型性状鉴定评价。总体上看，供试资源遗传多样性较高，遗传背景较为丰富。其中，质量性状遗传多样性指数 H' 平均值为 1.0895，芽鞘色、幼苗叶色、主脉色、穗型、颖壳包被度和分蘖性的 H' 略低，分别为 1.0366、0.2235、0.6631、0.9619、1.0631 和 0.9908；穗型、颖壳色、粒色的 H' 值较高，分别为 1.3980、1.7641 和 1.7039。数量性状 H' 平均值为 1.9467，全生育期、株高、茎粗、穗长、穗柄长、穗粒重、千粒重、着壳率和角质率分别为 2.048、1.925、2.047、1.982、2.053、2.031、2.069、1.437 和 1.927。可见，供试资源数量性状遗传多样性普遍高于质量性状，这与周瑜等^[20]和冯国郡等^[31]研究结果一致。具体来看，质量性状中，穗型以中紧最多，其次为紧型，侧散最少；而粒色方面，以白色最多，红色和黑色最少；穗型偏紧可能与供试资源多来自我国北方及国外干旱、半干旱地区有关，而粒色偏浅可能与这些资源多为饲用或食用高粱，其单宁含量偏低有关。数量性状中，株高与生物量及抗倒性直接相关，本研究筛选到 100.00 cm 以下的特矮秆资源 13 份，远多于周瑜等^[20]434 份资源中的 1 份，可能与本试验材料中来自国外的矮秆材料较多有关。茎粗不仅与高粱抗倒性息息相关，也间接影响了茎秆储存光合产物的能力^[20]。本研究发现，400 份参试高粱茎粗差异很大，但多集中在 1.50 cm 以上，说明抗倒性总体较好。穗长穗长是高粱最重要的表型性状之一，前人研究普遍认为高粱穗长变异度较高^[13,20,24,26]，本研究也发现供试高粱穗长从 9.20 cm 到 79.50 cm 不等，变异系数达 24.98，说明高粱穗长是其遗传多样性最丰富的表型性状之一，这也是高粱用途多样的重要基础。江苏地处季风性气候带，夏秋季温湿度偏高，更适合散穗型高粱种植且用途多为酒用高粱，因此供试资源大多需要改良后方可在江苏进行育种利用。经过综合评估，本研究筛选出全生育期较短、株高较矮、穗型偏散的 8 份优异资源，这些材料可为江苏麦后夏播高粱育种提供基础材料。

明确不同表型性状之间的连锁关系对于高粱育种实践中的性状联合选择具有重要参考价值^[32]。本研究对供试高粱数量性状的相关分析结果显示，株高和全生育期呈极显著正相关，与周瑜等^[20]和于纪珍等^[33]研究结果一致，说明晚熟高粱材料的营养生长期也相应变长，从而导致株高增高，这与本试验田间观测的晚熟品种多为植株高大的甜高粱相一致。同时，株高还与穗长及穗柄长也呈不同程度的正相关，且均达极显著水平，与前人研究结果基本一致^[20,34-35]，这可能与穗长和穗柄长本身就是株高的重要组成部分有关，二者的增长共同促进了株高增高。此外，本研究还发现，穗长与千粒重呈极显著负相关，与穗粒重没有显著相关性，而周瑜等^[20]研究发现穗长与穗粒重呈极显著负相关，说明单一通过增加高粱穗长并不一定能增加单穗粒重从而提高籽粒产量^[36]，育种实践还需考虑穗长、千粒重及穗粒数的协调统一。

对数量较大的种质资源进行分类有助于资源精准评价和育种利用。周瑜等^[20]基于株高等 10 个数量性状将国内外 434 份高粱种质资源分为饲草（能源）、工艺及粒用三大类。张一中等^[24]在江苏淮南地区基于发芽指数等 7 个数量性状将 175 份高粱种质资源分为高大综合型、帚用型、高产型和大粒型 4 个类群；李春宏等^[23]在同一基地基于节数、穗柄长、株高、抽穗期、穗长、百粒重等 15 个性状将江苏本地高粱资源分为

7 大类, 类群间存在交叉用途, 以粒用型、工艺型和兼用型为主。本研究在江苏淮北地区根据株型因子、穗型因子以及产量因子等数量性状进行聚类分析, 将供试高粱为 3 个类群, 不同类群高粱主要农艺性状上差异性和互补性明显。其中类群 I 共有 135 份资源, 该类资源植株高大且穗柄较长, 具有能源高粱的优良特性, 可以为江苏沿海地区能源用高粱开发提供优质种源选择。类群 II 共有 175 份资源, 该类资源穗长和穗柄长较短, 穗粒重较高且着壳率较低, 可从该类群中筛选植株高大且穗粒重较高的材料用于江苏淮北地区粮饲兼用型育种利用。类群 III 共 90 份资源, 该类资源株高最矮, 穗粒重和千粒重较高, 且全生育期较短, 是粒用高粱的优异种质, 可作为江苏粒用高粱新种质创制和品种选育的基础材料。

主成分分析可用少数的变量因子来概括解释整体变量信息。乔婧等^[37]从 20 份粒用高粱资源 9 个农艺性状的主成分分析中获得反映株型、籽粒产量与穗形的 3 个主成分。张一中等^[24]在江苏淮南地区从 175 份高粱资源的 7 个农艺性状中提取了反映生物量、穗部特征、发芽特性和籽粒大小的 4 个主成分。而王官等^[38]与刘翔宇等^[39]和对甜高粱的主成分分析发现, 株型因子、籽粒产量因子和锤度因子贡献较高。本研究在江苏淮北地区将 400 份高粱种质资源的 9 个数量性状提取为 4 个主成分, 分别反映了穗部性状、籽粒产量、籽粒灌浆和生物量等因子信息, 对应性状可在种质资源创制和育种实践中予以重点研究。

4 结论

本研究在江苏淮北高粱主产区系统调查了 400 份国内外高粱种质资源的主要农艺性状, 并利用 Shannon-weaver 多样性指数、相关分析、聚类分析和主成分分析对其表型性状的遗传变异水平进行了综合分析, 发现供试高粱种质资源遗传背景非常丰富, 主要表型性状间存在着较大差异且相互影响和制约。试验筛选出全生育期较短、株高较矮、穗型偏散的 8 份优异资源, 可为江苏高粱种质资源创制和育种研究提供基础材料。

参考文献

- [1] Sessaiah C V, Rao S J, Reddy Y R, Nagalakshmi D, Mahender M, Harikrishna C H. Effect of feeding processed sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L) moench) crushed residue based complete ration on growth performance and feeding behavior of murrah buffalo calves. *Veterinary World*, 2013, 6(3): 151-155
- [2] 卢庆善. 高粱学: 中国农业出版社, 1999
Lu Q S. *Sorghum Science*: China Agricultural Press, 1999
- [3] 卢庆善, 邹剑秋, 朱凯, 张志鹏. 试论我国高粱产业发展——论全国高粱生产优势区. *杂粮作物*, 2009, 29(02): 78-80
Lu Q S, Zou J Q, Zhu K, Zhang Z P. Discussion on the development of sorghum industry in China: a discussion on the national sorghum production advantageous areas. *Minor Cereal Crops*, 2009, 29(02): 78-80
- [4] 郭世伟, 江荣风, 张福锁. 粮食品质与人体营养. *世界农业*, 1997(12): 42-43
Guo S W, Jiang R F, Zhang F S. Grain quality and human nutrition. *World Agriculture*, 1997(12): 42-43
- [5] 张福耀, 平俊爱, 赵威军. 中国酿造高粱品质遗传改良研究进展. *农学学报*, 2019, 9(03): 21-25
Zhang F Y, Ping J A, Zhao W J. Genetic quality improvement of brewing sorghum in China: research progress. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(03): 21-25.
- [6] 李顺国, 刘猛, 刘斐, 邹剑秋, 陆晓春, 刁现民. 中国高粱产业和种业发展现状与未来展望. *中国农业科学*, 2021, 54(03): 471-482
Li S G, Liu M, Liu F, Zou J Q, Lu X C, Diao X M. Current status and future prospective of sorghum production and seed industry in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(03): 471-482
- [7] 李春宏. 酿酒高粱在江苏的发展前景与展望. *大麦与谷类科学*, 2019, 36(04): 18-20.
Li C H. The prospect of development of sorghum planting industry for making liquor in Jiangsu province. *Barley and Cereal Sciences*, 2019, 36(04): 18-20
- [8] 徐鹏, 李春宏, 左文霞, 周培士, 李伟, 薛燕军, 沈新莲. 江苏省酿酒高粱产业现状与发展趋势. *江苏农业科学*, 2022, 50(09): 17-20
Xu P, Li C H, Zuo W X, Zhou P S, Li W, Xue Y J, Shen X L. The industry status and development trends of brewing sorghum in Jiangsu province. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(09): 17-20
- [9] 刘旭, 李立会, 黎裕, 方涛. 作物种质资源研究回顾与发展趋势. *农学学报*, 2018, 8(1): 10-15
Liu X, Li L H, Li Y, Fang W. Crop germplasm resources: advances and trends. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 10-15

- [10] 曹文伯. 我国甜高粱种质资源鉴定及利用概况. 植物遗传资源科学, 2001(01): 58-62
Cao W B. A survey of characterization and utilization for Chinese sweet sorghum. Journal of Plant Genetic Resources, 2001(01): 58-62
- [11] 朱志华, 李为喜, 刘方, 张晓芳, 王文真. 高粱种质资源主要品质性状鉴定与评价. 植物遗传资源学报, 2003(04): 326-330
Zhu Z H, Li W X, Liu F, Zhang X F, Wang W Z, Liu S C, Li Y. Identification and evaluation of quality traits in sorghum germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2003, 4(4): 326-330
- [12] 王自力, 张北举, 李魁印, 陈松树, 徐如宏, 李鲁华, 吴传喜, 任明见. 高粱种质资源表型性状多样性分析及综合评价. 江苏农业科学, 2022, 50(18): 115-121
Wang Z L, Zhang B J, Li K Y, Chen S S, Xu R H, Li L H, Wu C X, Ren M J. Analysis and comprehensive evaluation of phenotypic trait diversity of sorghum germplasm resources. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(18): 115-121
- [13] 高旭, 冯周, 丁延庆, 徐建霞, 曹宁, 程斌, 汪灿, 张立异. 257份高粱种质资源农艺性状的遗传多样性. 西南农业学报, 2023, 36(01): 1-10
Gao Xu, F Z, Ding Y Q, Xu J C N, Cheng B, Wang C, Zhang Y L. Genetic diversity of agronomic traits of 257 sorghum germplasm resources. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(01): 1-10
- [14] 何继红, 董孔军, 刘敏轩, 任瑞玉, 张磊, 杨天育, 陆平. 甘肃省新征集高粱地方品种资源的鉴定与遗传多样性评价. 植物遗传资源学报, 2015, 16(03): 479-484
He J H, Dong K J, Liu M X, Ren R Y, Zhang L, Yang T Y, Lu P. Identification and genetic diversity evaluation of new-collective germplasm of sorghum in Gansu province. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(03): 479-484
- [15] 刘秀慧, 陈合云, 邹桂花, 刘合芹, 郑学强, 陈小央. 浙江地方高粱种质资源表型鉴定评价分析及利用. 浙江农业科学, 2022, 63(08): 1887-1890
Liu X H, Chen H Y, Zou G H, Liu H Q, Zheng X Q, Chen X Y. Phenotypic identification, evaluation, and utilization of local sorghum germplasm resources in Zhejiang. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(08): 1887-1890
- [16] 覃初贤, 覃欣广, 邢钊浩, 温东强, 望飞勇, 郭阳峰. 广西高粱资源主要农艺性状的遗传多样性及相关分析. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 65-75
Tan C X, Tan X G, Xing Y H, Wen D Q, Wang F Y, Guo Y F. Genetic diversity and related analysis of main agronomic traits in Guangxi sorghum resources. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(13): 65-75
- [17] 吴国江, 周伟, 余忠浩, 李岩, 吕静波, 王振国, 周亚星. 基于主成分、灰色关联和DTOPSIS分析的176份糯高粱种质资源综合评价. 河南农业科学, 2023, 52(05): 40-51
Wu G J, Zhou W, Yu Z H, Li Y, Lv J B, Wang Z G, Zhou Y X. Comprehensive evaluation of 176 waxy sorghum germplasm resources based on principal component, grey correlation and DTOPSIS analyses. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(05): 40-51
- [18] 牛雪婧, 王新栋, 王金萍, 孙娟, 郗彦敏, 王丽娜, 耿立格. 高粱地方种质资源表型多样性分析及综合评价. 植物遗传资源学报, 2024, 25(04): 562-575
Niu X J, Wang X D, Wang J P, Sun J, Qi Y M, Wang L N, Geng L G. Genetic diversity and comprehensive evaluation of sorghum germplasm based on phenotypic traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(04): 562-575
- [19] 王黎明, 焦少杰, 姜艳喜, 严洪冬, 苏德峰, 孙广全, 张华. 帚高粱的遗传多样性及其在种质创新中的应用. 植物遗传资源学报, 2018, 19(06): 1083-1091
Wang L M, Jiao S J, Jiang Y X, Yan H D, Su D F, Sun G Q, Zhang H. Genetic diversity of broomcorn sorghum and its utilization on genetic enhancement. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(06): 1083-1091
- [20] 周瑜, 李泽碧, 黄娟, 吴毓, 张亚勤, 张志良, 张晓春. 高粱种质资源表型性状的遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2021, 22(03): 654-664
Zhou Y, Li Z B, Huang J, Wu Y, Zhang Y Q, Zhang Z L, Zhang X C. Genetic diversity of sorghum germplasm based on phenotypic traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(03): 654-664
- [21] 孙远涛, 龙文靖, 李元, 刘天朋, 赵甘霖, 丁国祥, 倪先林. 45份糯高粱种质资源主要农艺性状和SSR标记的遗传多样性分析. 作物杂志, 2024(01): 57-64
Sun Y T, Long W J, Li Y, Liu T P, Zhao G L, Ding G X, Ni X L. Genetic Diversity Analysis of 45 glutinous sorghum germplasm based on major agronomic traits and SSR markers. Crops, 2024(01): 57-64
- [22] 段国旗, 吕娜, 石颖怡, 张怀, 李斌峰, 侯留飞, 许文秀, 闫慧莉, 何振艳, 平俊爱. 高粱株高相关基因*SbPH11*分子标记的开发和应用. 植物遗传资源学报, 2024, 25(01): 111-119
Duan G X, Lv N, Shi Y Y, Zhang H, Li B F, Hou L F, Xu W X, Yan H L, He Z Y, Ping J A. Development and application of molecular markers for the gene *SbPH11* related to sorghum plant height. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(01): 111-119
- [23] 李春宏, 狄佳春, 颜伟, 郭文琦, 朱银, 殷剑美, 王立, 韩晓勇, 蒋璐, 张培通. 江苏省高粱种质资源的收集及多样性分析. 植物遗传资源学报, 2020, 21(05): 1175-1185
Li C H, Di J C, Yan W, Guo W Q, Zhu Y, Yin J M, Wang L, Han X Y, Jiang L, Zhang P T. Collection and diversity analysis of sorghum germplasm resource in Jiangsu province. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(05): 1175-1185
- [24] 张一中, 李春宏, 孟珊, 张香桂, 徐鹏, 郭文琦, 梁笃, 郭琦, 张晓娟, 范听琦, 聂萌恩, 柳青山. 江苏省引进高粱种质表型性状遗传多样性分析. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 32-42
Zhang Y Z, Li C H, Meng S, Zhang X G, Xu P, Guo W Q, Liang D, Guo Q, Zhang X J, Fan X Q, Nie M E, Liu Q S. Genetic diversity and cluster analysis

- of phenotypic traits of 175 imported sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) germplasm resource in Jiangsu Province. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(3):32-42
- [25] 陆平. 高粱种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006: 8-27
Lu P. Descriptors and data standard for sorghum. Beijing: China Agricultural Publishers, 2006: 8-27
- [26] 赵香娜, 李桂英, 刘洋, 陆平, 顿宝庆, 岳美琪, 张璞. 国内外甜高粱种质资源主要性状遗传多样性及相关性分析. 植物遗传资源学报, 2008(03): 302-307
Zhao X N, Li G Y, Liu Y, Lu P, Dun B Q, Yue M Q, Zhang P. Genetic diversity and correlation analysis of main agronomic characters in domestic and foreign sweet sorghum germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2008, 9(3): 302-307
- [27] Shannon E C, Weaver W. The mathematical theory of communication. Chicago: The University of Illinois, Urbana, 1949: 3-14
- [28] 董昕, 李淑君, 杨华, 官玲, 付忠军, 祁志云, 金川, 余雪源, 易红华, 陈荣丽, 张丕辉. 重庆玉米地方品种表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2019, 20(04): 861-870
Dong X, Li S J, Yang H, Guan L, Fu Z J, Qi Z Y, Jin C, Yu X Y, Yi H H, Chen R L, Zhang P H. Phenotypic diversity of maize landraces collected from Chongqing. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(4): 861-870
- [29] 王黎明, 焦少杰, 姜艳喜, 严洪冬, 苏德峰, 孙广全. 不同来源甜高粱种质资源的表型遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2014, 15(02): 411-416
Wang L M, Jiao S J, Jiang Y X, Yan H D, Su D F, Sun G Q. Genetic diversity analysis on sweet sorghum germplasm resources of different origins based on agronomical traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(2): 411-416
- [30] Upadhyaya H D, Sharma S, Ramulu B, Bhattacharejee R, Gowda C L L. Variation for qualitative and quantitative traits and identification of trait specific sources in new sorghum germplasm. Crop and Pasture Science, 2010, 61: 609-618
- [31] 冯国郡, 李宏琪, 叶凯, 李桂英, 涂振东, 郭建富. 甜高粱种质资源在新疆的多样性表现及聚类分析. 植物遗传资源学报, 2012, 13(03): 398-405
Feng G J, Li H Q, Ye K, Li G Y, Tu Z D, Guo J F. Genetic diversity and cluster analysis of sweet sorghum germplasm in Xinjiang. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(3): 398-405
- [32] Seetharam K. Phenotypic assessment of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) germplasm reference set for yield and related traits under post flowering drought conditions. Coimbatore: Tamil Nadu Agricultural University, 2011
- [33] 于纪珍, 王瑞, 詹鹏杰, 平俊爱, 张福耀. 中国主要高粱杂交种农艺及品质性状多样性分析. 作物杂志, 2017(05): 49-54
Yu J Z, Wang R, Zhan P J, Ping J A, Zhang F Y. Diversity of agronomic and quality traits of major sorghum hybrids in China. Crops, 2017(5): 49-54
- [34] 邵初阳, 何晓兰, 徐照龙, 张大勇, 黄益洪, 卫培培, 许玲, 刘晓庆, 郭士伟, 彭陈, 葛婷婷, 王为. 甜高粱种质资源多样性及主要农艺参数聚类分析. 江苏农业学报, 2015, 31(05): 984-994
Shao C Y, He X L, Xu Z L, Zhang D Y, Huang Y H, Wei P P, Xu L, Liu X Q, Guo S W, Peng C, Ge T T, Wang W. Genetic diversity of sweet sorghum germplasm resources and clustering of major agronomical traits. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2015, 31(5): 984-994
- [35] 陈艳丽, 田承华, 田怀东. 国内外高粱种质资源形态性状与农艺性状的多样性分析. 山西农业科学, 2015, 43(04): 378-382
Chen Y L, Tian C H, Tian H D. Diversity analysis of morphological and agronomic characters of sorghum at home and abroad. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43 (4): 378-382
- [36] Ezeaku I E, Mohammed S G. Character association and path analysis in grain sorghum. African journal of Biotechnology, 2006, 5(14): 1337-1340.
- [37] 乔婧, 高海燕, 李文清, 邵强. 粒用高粱种质资源主要农艺性状的相关性及主成分分析. 山西农业科学, 2019, 47(11): 1903-1906
Qiao J, Gao H Y, Li W Q, Shao Q. Correlation and principal component analysis of main agronomic characters of grain sorghum germplasm resources. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(11): 1903-1906
- [38] 王官, 赵威军, 张阳, 邵荣峰, 张伟, 薛丁丁, 范国华, 王磊. 甜高粱种质资源主要农艺性状的主成分及聚类分析. 农学学报, 2019, 9(05): 5-9
Wang G, Zhao W J, Zhang Y, Shao R F, Zhang W, Xue D D, Fan G H, Wang L. Main agronomic characters of sweet sorghum germplasm: principal component analysis and cluster analysis. Journal of Agriculture, 2019, 9(05): 5-9
- [39] 刘翔宇, 刘祖昕, 加帕尔, 斯拉依丁, 阿依加马力·加帕尔, 郭峰. 基于主成分与灰色关联分析的甜高粱品种综合评价. 新疆农业科学, 2016, 53(01): 99-107
Liu X Y, Liu Z X, Gapar, Slaydin, Ayigamarli G, Guo F. Comprehensive evaluation of sweet sorghum varieties based on principal component silabi analysis and gray relational grade analysis. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(01): 99-107