植物遗传资源学报 2025，26（4）：731-746
Journal of Plant Genetic Resources DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20240818001

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的问题，本研究以来自国内外的400份高粱种质资源为材料，利用Shannon-Weaver遗传多样性指数、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、着壳率和角质率的遗传多样性指数普遍高于质量性状，分别为2.0479、1.9254、2.0472、1.9822、2.0531、2.0314、2.0693、1.4375和1.9265。相关分析结果表明，株高与全生育期、穗长、穗柄长、穗粒重和着壳率均呈极显著正相关，与千粒重呈显著负相关；穗粒重与全生育期、千粒重均呈极显著正相关；穗长与穗柄长、着壳率均呈极显著正相关，与千粒重呈极显著负相关。基于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，可作为能源材料开发；类群Ⅱ穗长和穗柄长较短，可从中筛选适合粮饲兼用型育种的资源；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、穗型偏散的优良资源，可供江苏地区育种利用。

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 Shangkun[1]，PAN Mingquan[1]，ZHU Li[2]，LIU Minxuan[3]，JIN Qian[1]，LIU Xiaofei[1]，LU Ping[3]，WANG Weijun[1]
（[1]*Suqian Institute of Agriculatural Sciences，Jiangsu Academy of Agricultural Sciences，Suqian 223800*；
[2]*Biotechnology Research Institute，Chinese Academy of Agricultural Sciences，Beijing 100081*；
[3]*Institute of Crop Sciences，Chinese Academy of Agricultural Sciences，Beijing 100081*）

Abstract： To address the shortage of locally suitable varieties and elite sorghum［*Sorghum bicolor*（L.）Moench］germplasm resources in Jiangsu's sorghum industry，the genetic variation of 400 accessions from local and global was comprehensively analyzed in northern Jiangsu，followed by statistical analysis including the Shannon-Weaver genetic diversity index，correlation analysis，cluster analysis and principal component analysis. The results showed that these accessions exhibited 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 shape，glume color，grain color，tillering and grain covering，were 1.0366，0.2235，

收稿日期： 2024-08-18 **网络出版日期：** 2025-01-03
URL：https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240818001
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

0.6631, 1.3980, 0.9619, 1.7641, 1.7039, 1.0631 and 0.9908, respectively. In contrast, 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, showing 2.0479, 1.9254, 2.0472, 1.9822, 2.0531, 2.0314, 2.0693, 1.4375, and 1.9265, respectively. Correlation analysis revealed that plant height was significantly positively correlated with the period of duration, panicle length, peduncle length, grain weight per spike, glume seed percentage, but significantly negatively correlated with thousand-grain weight. Grain weight per spike was significantly positively 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. Cluster analysis of the quantitative traits grouped these accessions into three clusters at the Euclidean distance of 15. Cluster I, characterized by taller plants, smaller panicle and lower thousand-grain weight, is suitable for development as energy crop. Cluster II, with the characteristics of shorter panicle length and peduncle length, can serve as germplasm for dual-purpose grain and forage breeding. Cluster III, with the characteristics of dwarf, early maturity and large panicle, can be used as a foundation for germplasm enhancement and grain sorghum breeding. 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, eight elite accessions with shorter growth duration, shorter plant height and loose panicle type, were selected, with a potential to be used in sorghum breeding programs in Jiangsu province, China.

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，但江苏省高粱产业却远远落后于国内其他高粱产区，主要原因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。在品质性状方面，朱志华等[11]在北京对国内12个省份的532份高粱资源的蛋白、淀粉和单宁含量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。在地方资源方面，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。在异地资源鉴定方面，王黎明等[19]在黑龙江对来自中国、美国及东欧的173份帚高粱资源进行了表型鉴定，周瑜等[20]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 *SbPH11* 基因的两个功能性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]在江苏南京对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]也在江苏南京对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、广来源的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。因此，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。为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份、14份和6份；东北25份：辽宁、黑龙江、吉林分别为16份、8份和1份；西北7份：甘肃、新疆和陕西分别为4份、2份和1份；西南14份：云南11份、四川3份；华中6份：湖北4份、湖南2份；华东7份，均来源山东。另外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　Information of 400 sorghum germplasm accessions 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	22	大中粘高粱	中国河北	43	老姑座	中国辽宁
2	八叶齐	中国内蒙古	23	大关东青	中国河北	44	青壳高粱	中国辽宁
3	大黄壳	中国辽宁	24	大蛇眼白	中国河北	45	岫岩紧	中国辽宁
4	小粘棒	中国辽宁	25	大蛇眼红	中国河北	46	黄壳散	中国辽宁
5	平顶香	中国黑龙江	26	平身白	中国河北	47	黑黄棒子	中国辽宁
6	白粘高粱	中国辽宁	27	关东青	中国河北	48	散穗红壳	中国辽宁
7	对粒	中国辽宁	28	米高粱	中国河北	49	老鸹登	中国黑龙江
8	老鸹登	中国黑龙江	29	红壳白	中国河北	50	克恢22号	中国黑龙江
9	米棒子	中国黑龙江	30	红高粱	中国河北	51	二稀码	中国山东
10	珍珠白	中国内蒙古	31	紧码米青	中国河北	52	打锣锤	中国山东
11	歪脖张	中国辽宁	32	千斤红	中国山西	53	黄萼	中国山东
12	洋大粒	中国辽宁	33	圪塔穗	中国山西	54	黑皮高粱	中国山东
13	黄罗伞	中国吉林	34	竹叶青	中国山西	55	紫壳子高粱	中国山东
14	跃进4号	中国辽宁	35	纺穗高粱	中国山西	56	隔河偷	中国山东
15	鸽子灰	中国内蒙古	36	软茭子	中国山西	57	遭烘萼高粱	中国山东
16	瞎八石	中国辽宁	37	软茭子	中国山西	58	甘6513	中国甘肃
17	二铺粒	中国山西	38	歪脖金茭子	中国山西	59	早熟黑格棒	中国甘肃
18	二蛇眼红	中国河北	39	离石黄	中国山西	60	黑壳高粱	中国甘肃
19	小关东青	中国河北	40	黄高粱	中国山西	61	碎老汉	中国甘肃
20	小高粱	中国河北	41	粘高粱	中国内蒙古	62	一把伞(翼城)	中国山西
21	小粒白高粱	中国河北	42	大黑头	中国辽宁	63	白高粱(阳高)	中国山西

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
64	灯笼红(忻州)	中国山西	103	KO2-Kass	乍得	142	E90	印度
65	紧穗高粱(稷山)	中国山西	104	S.durrha	捷克	143	E92	印度
66	黄壳子高粱(永和)	中国山西	105	埃塞13	埃塞俄比亚	144	E-302	印度
67	黑63027	中国黑龙江	106	Sg 1681	法国	145	E-303	印度
68	贼不偷高粱(宁陕)	中国陕西	107	Sg 1765	法国	146	Framida	印度
69	黑暴糯高粱(广南)	中国云南	108	Sg 1975	法国	147	ICSH 138	印度
70	小黑壳(哲盟)	中国内蒙古	109	Sg 1979	法国	148	ICSH 142	印度
71	哲38恢	中国内蒙古	110	Sg 3658	法国	149	ICSH 159	印度
72	低晋5	中国山西	111	Sg 4106	法国	150	ICSH 205	印度
73	晋铁2	中国山西	112	Sg 4149	法国	151	ICSH 228	印度
74	晋5-0	中国山西	113	Sg 4155	法国	152	ICSH 229	印度
75	特紧1	中国山西	114	Sg 4194	法国	153	ICSH 230	印度
76	克恢45	中国黑龙江	115	Sg 4469	法国	154	ICSH 245	印度
77	绥恢16	中国黑龙江	116	Sg 4516	法国	155	ICSH 281	印度
78	红高粱	中国湖北	117	Sg 4527	法国	156	ICSH 310	印度
79	铁高粱	中国湖北	118	Sg 4550	法国	157	ICSH 434	印度
80	高粱	中国湖北	119	Sg 4815	法国	158	ICSH 479	印度
81	高粱	中国湖北	120	Sg 4950	法国	159	ICSH 574	印度
82	湘攸22	中国湖南	121	Sg 5007	法国	160	ICSV-107	印度
83	郑梁8号	中国湖南	122	Sg 5056	法国	161	ICSV-108	印度
84	粘高粱(巫溪)	中国四川	123	Sg 5092	法国	162	ICSV-114	印度
85	落籽红壳(西昌)	中国四川	124	Sg 5103	法国	163	ICSV-120	印度
86	糯高粱(古蔺)	中国四川	125	Sg 5122	法国	164	ICSV-126	印度
87	丰谷高粱(西畴)	中国云南	126	Sg 5151	法国	165	ICSV-133	印度
88	长脖子高粱(元谋)	中国云南	127	Roce	西德	166	ICSV-137	印度
89	白高粱(文山)	中国云南	128	Vespa	西德	167	ICSV-138	印度
90	红高粱(开远)	中国云南	129	CKA（Male sterile）	匈牙利	168	ICSV-145	印度
91	饭高粱(景东)	中国云南	130	Sumac	匈牙利	169	ICSV-146	印度
92	黄红糯高粱(元谋)	中国云南	131	A531	印度	170	ICSV-147	印度
93	黄壳黄米高粱(元谋)	中国云南	132	ASR-2	印度	171	ICSV-148	印度
94	散穗高粱(呈贡)	中国云南	133	BR-307	印度	172	ICSV-149	印度
95	糯高粱(禄丰)	中国云南	134	BR-319	印度	173	ICSV-151	印度
96	糯高粱(嵩明)	中国云南	135	CSH9	印度	174	ICSV-153	印度
97	白高粱(吐鲁番)	中国新疆	136	CSV-4	印度	175	ICSV-155	印度
98	高粱(沙湾)	中国新疆	137	D-24089-81-K	印度	176	IS-103	印度
99	Alpha	澳大利亚	138	D-24149-81-K	印度	177	IS-156	印度
100	Hybrid Sorghum S32	英国	139	D-71246	印度	178	IS-160	印度
101	Sorghum NK300A	英国	140	E20	印度	179	IS-172	印度
102	Hybor MV309	英国	141	E77	印度	180	IS-183	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
181	IS-330（B68）	印度	220	M-60346	印度	259	M-66595	印度
182	IS-413	印度	221	M-60348	印度	260	M-66745	印度
183	IS-416	印度	222	M-60350	印度	261	M-66801	印度
184	IS-474	印度	223	M-60351	印度	262	M-66836	印度
185	IS-620	印度	224	M-60357	印度	263	M-66858	印度
186	Is 633	印度	225	M-60370	印度	264	M-66998	印度
187	IS-634	印度	226	M-60387	印度	265	M-67056	印度
188	IS-859（KD）	印度	227	M-60391	印度	266	M-67064	印度
189	IS-1054（M35）	印度	228	M-60394	印度	267	M-67074	印度
190	IS-1082	印度	229	M-60395	印度	268	M-67096	印度
191	IS-2122	印度	230	M-60419	印度	269	M-67209	印度
192	IS-2205	印度	231	M-60440	印度	270	M-67289	印度
193	IS-2312	印度	232	M-60443	印度	271	M-67300	印度
194	IS-2820	印度	233	M-60451	印度	272	M-67323	印度
195	IS-3161	印度	234	M-60452	印度	273	M-67337	印度
196	IS-3798	印度	235	M-60465	印度	274	M-67340	印度
197	IS-3977	印度	236	M-60750	印度	275	M-67361	印度
198	IS-18473（CSV-3.370）	印度	237	M-60752	印度	276	M-67366	印度
199	Is 18947（IS12610c）	印度	238	M-60806	印度	277	M-67395	印度
200	IS-18958（IS	印度	239	M-60826	印度	278	M-67408	印度
201	IS-19579	印度	240	M-60830	印度	279	M-67426	印度
202	M-40354（MR-807）	印度	241	M-60839	印度	280	M-67518	印度
203	M-40894（MR-821）	印度	242	M-61683	印度	281	M-67750	印度
204	M-60025B	印度	243	M-62554	印度	282	M-67769	印度
205	M-60159	印度	244	M-62572	印度	283	M-67781	印度
206	M-60169	印度	245	M-62671	印度	284	MR-811	印度
207	M-60252	印度	246	M-62676	印度	285	MR-823	印度
208	M-60253	印度	247	M-62689	印度	286	MR-829	印度
209	M-60254	印度	248	M-62766	印度	287	MR-832	印度
210	M-60256	印度	249	M-63259	印度	288	MR-840	印度
211	M-60272（SPV-472）	印度	250	M-63327	印度	289	MR-853	印度
212	M-60297	印度	251	M-63832	印度	290	MR-859	印度
213	M-60313	印度	252	M-66350	印度	291	SPV 126	印度
214	M-60315	印度	253	M-66378	印度	292	SPV 386	印度
215	M-60328	印度	254	M-66444	印度	293	SPV 472	印度
216	M-60330	印度	255	M-66447	印度	294	SPV 475	印度
217	M-60334	印度	256	M-66467	印度	295	Tx 3048A	印度
218	M-60337	印度	257	M-66475	印度	296	Tx 3048B	印度
219	M-60338	印度	258	M-66478	印度	297	Zera-Zera-1	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
298	0-1	印度	333	77CS284	墨西哥	368	Sedan red Kafer #1103	美国
299	0-5	印度	334	79T2846（LASON）80T 5058	墨西哥	369	Shallu #85	美国
300	168	印度	335	82CV 7816k	墨西哥	370	Tx-378A	美国
301	CHAL WAXY SORGHUM	日本	336	BTx434	墨西哥	371	Tx-378B	美国
302	EARLY WHEATLAND B	日本	337	S.L50	巴基斯坦	372	Tx-2721	美国
303	EARLY HEGARL	日本	338	Larba grasa	罗马尼亚	373	Tx-2727	美国
304	KALO 421	日本	339	Pahhuu Qhmapbg Henponem	罗马尼亚	374	Tx-2730	美国
305	MAYS AMBER	日本	340	ku3218	泰国	375	Tx-2731	美国
306	MOCKTAK	日本	341	Gsc-1757	美国	376	Tx-2736	美国
307	MOCTAC LOCAL	日本	342	Hegari #750	美国	377	Waxy sooner	美国
308	WHITE MARTIN B	日本	343	IS-1526c	美国	378	Wectern black hull kafir	美国
309	木浦在来种	日本	344	IS-2177c	美国	379	Wesken kafir #1117	美国
310	半月堂黍	日本	345	IS-3071C	美国	380	Westland kansas	美国
311	光川在来种	日本	346	IS-3620C	美国	381	Westlank milo G.C #38296	美国
312	黑色在来种	日本	347	IS-3911c	美国	382	Hado	苏联
313	万景台矮高粱	朝鲜	348	IS-4639C	美国	383	KSP7-7-22A	美国
314	ES 309	墨西哥	349	IS-5394C	美国	384	KSP7-7-22B	美国
315	IcScTV-9-1	墨西哥	350	IS-5892c	美国	385	9104A	美国
316	IcScTv-10-1	墨西哥	351	IS-6439C	美国	386	9104B	美国
317	ICSCTV-11-1	墨西哥	352	IS-6440C	美国	387	9105A	美国
318	ICSCTV-11-2	墨西哥	353	IS-6710C	美国	388	9105B	美国
319	ICSCTV-11-3	墨西哥	354	IS-7254c	美国	389	9108A	美国
320	IcSLV-8	墨西哥	355	IS-7444C	美国	390	9108B	美国
321	India Sinthetic-534-2-FC	墨西哥	356	IS-7537C	美国	391	9202A	美国
322	M 35032（Sc108-3×CS3541）	墨西哥	357	IS-7541c	美国	392	9202B	美国
323	M-40075B	墨西哥	358	IS-10477	美国	393	9701A	美国
324	PN4061-2	墨西哥	359	N 4610	美国	394	9701B	美国
325	PP-41	墨西哥	360	N 6229	美国	395	95706A	美国
326	PP 290	墨西哥	361	pink kafer	美国	396	95706B	美国
327	P74A461×TEPBUK-1-3-05-1	墨西哥	362	R 46①	美国	397	9707A	美国
328	RTx 430-1	墨西哥	363	R-line（TAMBK-52）①	美国	398	9707B	美国
329	（SC110-14×RTx430）-19-3-1	墨西哥	364	Ribbon cone georga	美国	399	9709A	美国
330	SURENO	墨西哥	365	Rice kafir	美国	400	9709B	美国
331	Swarnar	墨西哥	366	Rio 265-270（7514）	美国			
332	77CS276	墨西哥	367	RTx-7000	美国			

1.2　试验方法

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）进行，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℃，年均日照2216 h。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。试验顺序排列，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 d后间苗。播种前结合整地基施45%缓释复合肥（N∶P_2O_5∶K_2O为15%∶15%∶15%）600 kg/hm^2，其他管理措施同大田生产。

按照《高粱种质资源描述规范和数据标准》[25]，各品种分别选择三行区的中间一行观察记载芽鞘色、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。成熟后于各小区中间行连续取10株测量参试材料株高、茎粗、穗长和穗柄长，记载成熟期以计算全生育期；并从中随机取5穗进行室内考种，测定穗粒重、千粒重、着壳率和角质率，以两年观测平均值进行统计分析并依此筛选优良种质。

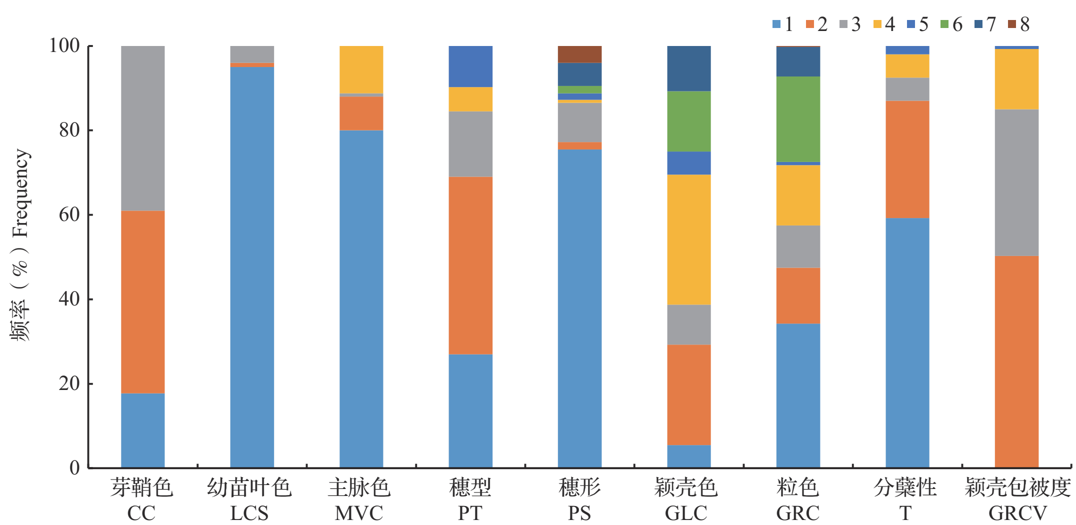
1.3　数据分析

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$X_i<(\bar{x}-2s)$到$X_i\geq(\bar{x}+2s)$，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：$H'=-\Sigma P_i \ln P_i$，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进行相关性分析和主成分分析。

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。参试种质资源变异较为丰富，共有48个



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：杯形，6：球形，7：伞形，8：帚形；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：裸露，2：包被1/4，3：包被1/2，4：包被3/4，5：全包被；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：Cup-shaped，6：Globular，7：Umbelliform，8：Broom like；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：Covered 1/4，3：Covered 1/2，4：Covered 3/4，5：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

类型。其中，芽鞘色以绿色(173份)和紫色(156份)为主，白色较少(71份)；幼苗叶色大部分是绿色(380份)，红色(4份)和紫色(16份)极少；主脉色以白色(320份)为主，绿色(45份)和浅黄(32份)次之，黄色极少(份3)；穗型以中紧(168份)和紧型(108份)为主，中散(62)次之，周散(39份)和侧散(23份)较少；穗形多为纺锤形(302份)，其次为圆筒形(37份)，其余形状均较少；颖壳色类型较为丰富，以红色(123份)和黄色(95份)较多，紫色(57份)和黑色(43份)次之，灰色(38份)、白色(22份)和褐色(22份)较少；粒色变异也比较丰富，以白色(137份)和红色(81份)较多，黄色(57份)、灰白(53份)、浅黄(40份)和褐色(28份)次之，橙色(3份)和黑色(1份)较少；大部分资源分蘖性为无(237份)，弱次之(111份)，中(22份)、强(22份)和很强(8份)较少；且颖壳包被度较低，以包被1/4(201份)和包被1/2(139份)为主，包被3/4(57份)次之，全包被(3份)极少，没有裸露资源。供试高粱种质质量性状遗传多样性指数平均值为1.0895，整体不高，其中穗型、颖壳色和粒色遗传多样性指数较高，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、分蘖性和颖壳包被度的遗传多样性指数略低，分别为1.0366、0.2235、0.6631、0.9619、1.0631和0.9908。

表2 400份参试高粱种质资源质量性状遗传多样性指数

Table 2 Genetic diversity index of qualitative traits of 400 tested sorghum germplasm resources

质量性状 Qualitative traits	数量分布 Quantity distribution								遗传多样性指数 H'
	1	2	3	4	5	6	7	8	
芽鞘色CC	白(71)	绿(173)	紫(156)						1.0366
幼苗叶色LCS	绿(380)	红(4)	紫(16)						0.2235
主脉色MCV	白(320)	浅黄(32)	黄(3)	绿(45)					0.6631
穗型PT	紧(108)	中紧(168)	中散(62)	侧散(23)	周散(39)				1.3980
穗形PS	纺锤形(302)	牛心形(7)	圆筒形(37)	棒形(3)	杯形(6)	球形(7)	伞形(22)	帚形(16)	0.9619
颖壳色GLC	白(22)	黄(95)	灰(38)	红(123)	褐(22)	紫(57)	黑(43)		1.7641
粒色GRC	白(137)	灰白(53)	浅黄(40)	黄(57)	橙(3)	红(81)	褐(28)	黑(1)	1.7039
分蘖性T	无(237)	弱(111)	中(22)	强(22)	很强(8)				1.0631
颖壳包被度GRCV	裸露(0)	包被1/4(201)	包被1/2(139)	包被3/4(57)	全包被(3)				0.9908

括号内数据为各级别种质数量

The data in parentheses represent the quantity of germplasm resources at each level

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，9个数量性状的变异系数在8.85%~136.33%之间，平均变异系数为40.01%，其中变异系数较大的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，而变异系数最小的为全生育期，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在1.4375~2.0693之间，平均值为1.9467，其中全生育期、株高、茎粗、穗长、穗柄长、穗粒重、千粒重、着壳率和角质率遗传多样性指数分别为2.0479、1.9254、2.0472、1.9822、2.0531、2.0314、2.0693、1.4375和1.9265，除着壳率以外，其余数量性状的遗传多样性指数均在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以小麦-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。

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

数量性状 Quantitative traits	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	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±11.20	125.50	8.85	2.0479
株高(cm)PH	447.00	83.00	247.20±70.00	245.00	28.31	1.9254
茎粗(cm)SD	2.20	1.00	1.50±0.30	1.49	18.39	2.0472
穗长(cm)MPL	79.50	9.20	26.50±6.60	26.00	24.98	1.9822
穗柄长(cm)PL	78.30	11.10	41.70±9.90	41.45	23.79	2.0531
穗粒重(g)GWPS	111.00	2.60	41.40±22.40	41.00	54.18	2.0314
千粒重(g)TGW	45.60	9.20	26.40±6.20	25.95	23.33	2.0693
着壳率(%)GSP	100	0.20	14.40±19.70	8.00	136.33	1.4375
角质率(%)EC	95.00	0.50	63.00±26.40	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

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，100.01~150.00 cm之间的矮秆资源有21份，150.01~200.00 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。

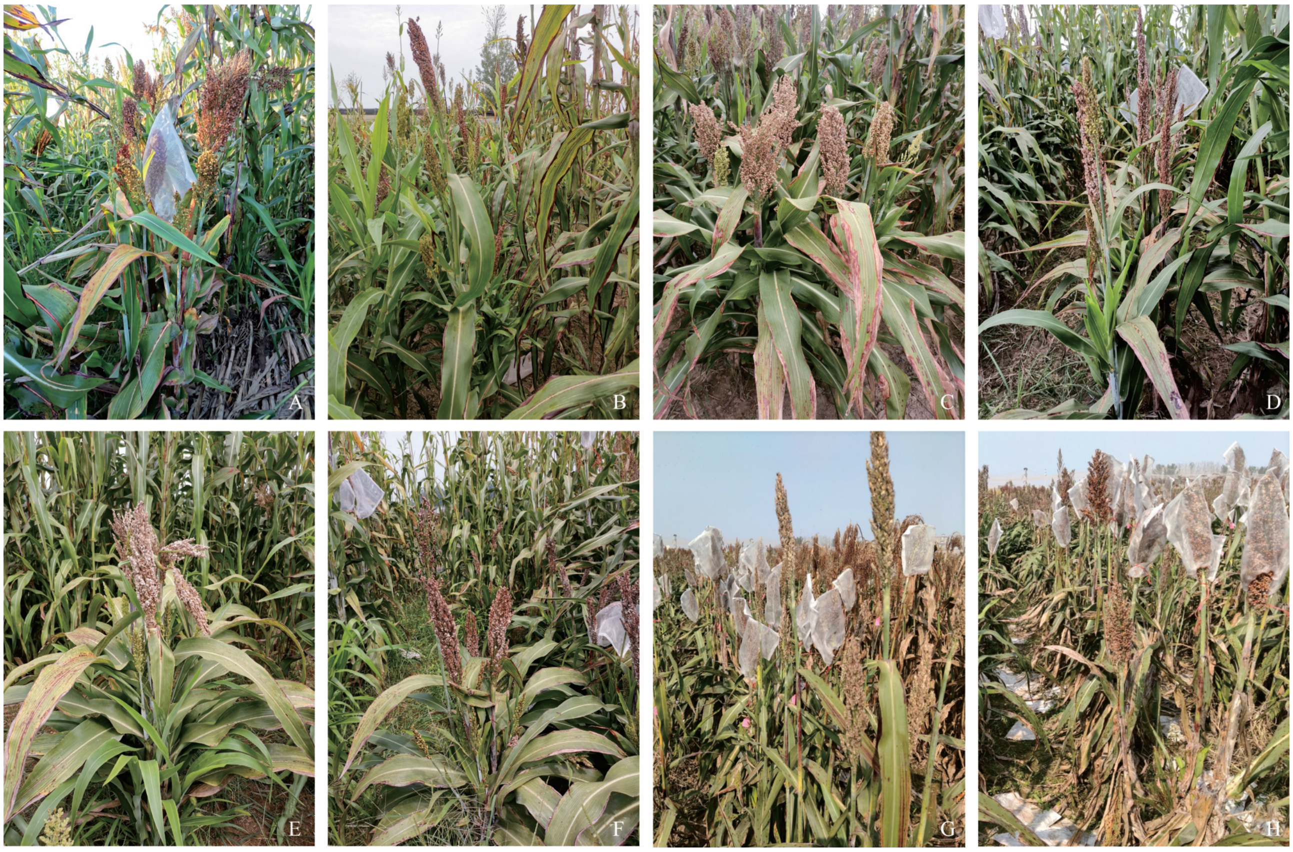
茎粗与植株抗倒能力紧密相关，不同高粱资源间茎粗差异很大，但都在1.00 cm以上，其中1.50 cm以上的资源占全部资源的45.50%。穗长是高粱最重要的表型性状之一，400份供试资源间穗长差异也很大，其中最短的是来自印度的IS-2312，只有9.20 cm，最长的是来自我国山西的软茭子，长达79.50 cm。穗柄长影响高粱机械收获质量，400份高粱资源的穗柄长在11.10~78.30 cm之间，主要集中在20.01~50.00 cm，占全部材料的79.50%。供试资源间的穗粒重差异也非常大，其中最小的仅2.60 g，而最大的高达111.00 g，穗粒重分布在20.10~80.00 g之间的材料较多，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的种质占12.75%，大于35.00 g的种质占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紧密相关，供试资源着壳率和角质率变幅也均较大，说明其中含有适合各种用途的个体材料。

综上，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（120 d以内）、株高较矮（180 cm以下）、穗型偏散（中散或周散）的8份优异资源（表4，图2），这些资源均为矮秆抗倒、早熟宜机、穗型偏散类型，非常适合江苏地区气候特点和酿造用途，可为江苏高粱育种研究和产业发展提供优异材料。

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.	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	牛心形	红	107	160	1.40	20.0	31.8	50.0	28.0	15.40
302	EARLY HEATLAND B	日本	中散	纺锤形	红	116	174	1.15	25.8	42.2	28.4	21.7	21.00
357	IS-7541c	美国	周散	纺锤形	白	115	98	1.62	33.8	52.8	12.9	27.8	16.00
362	R 46①	美国	中散	纺锤形	白	119	101	1.02	28.2	47.4	6.5	20.3	2.00
375	Tx-2731	美国	中散	纺锤形	灰白	111	113	1.78	31.1	51.6	16.0	27.6	2.30
380	Westland kansas	美国	中散	纺锤形	红	119	95	1.79	26.3	41.6	11.6	25.2	24.70
383	KSP7-7-22A	美国	中散	杯形	红	116	98	1.88	24.6	37.3	46.3	26.0	2.00
384	KSP7-7-22B	美国	中散	杯形	红	116	98	1.88	24.6	37.3	46.3	26.0	2.00



A：八叶齐；B：EARLY HEATLAND B；C：IS-7541c；D：R 46①；E：Tx-2731；F：Westland kansas；G：KSP7-7-22A；H：KSP7-7-22B

A：Bayeqi

图2 筛选到的优异高粱种质资源

Fig. 2 Selected elite sorghum germplasm resources

2.3 基于数量性状的相关性分析

对400份供试高粱种质资源9个数量性状进行相关性分析，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、千粒重均呈极显著正相关。穗长与穗柄长、着壳率均呈极显著正相关，而与千粒重呈极显著负相关（表5）。以上结果说明供

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								
株高PH	0.195**	1							
茎粗SD	0.007	0.031	1						
穗长MPL	−0.050	0.199**	−0.014	1					
穗柄长PL	−0.030	0.229**	−0.098	0.785**	1				
穗粒重GWPS	0.323**	0.189**	0.040	0.065	0.030	1			
千粒重TGW	0.057	−0.109*	0.043	−0.149**	−0.129**	0.225**	1		
着壳率GSP	−0.021	0.248**	−0.115	0.180**	0.199**	−0.063	−0.129**	1	
角质率EC	−0.010	−0.044	−0.025	0.089	0.155	−0.350	−0.050	−0.042	1

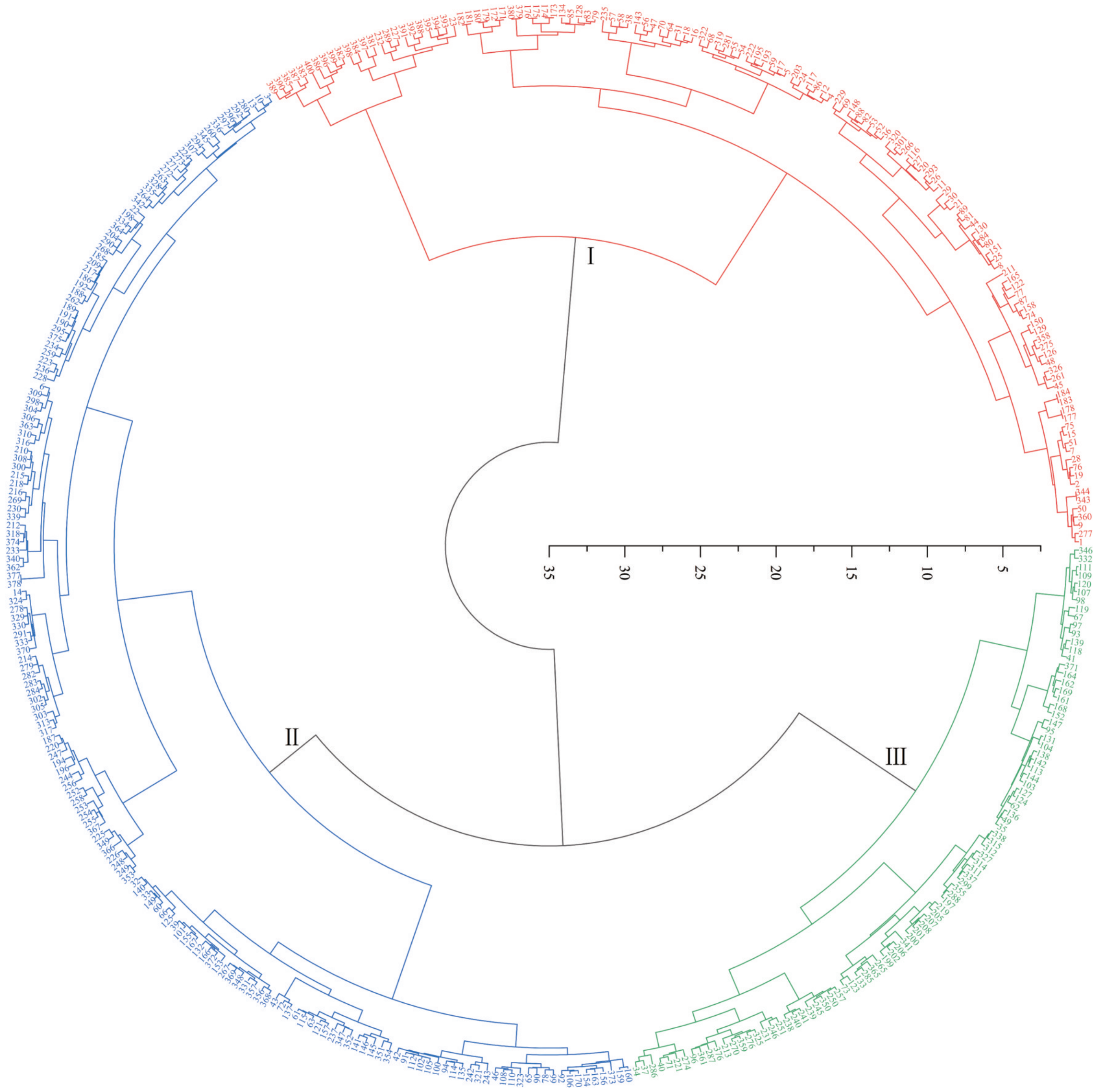
**表示在1%水平极显著相关，*表示在5%水平显著相关

** indicates extremely significant correlation at 1% level, * indicates significant correlation at 5% level

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关系。

2.4　基于数量性状的聚类分析

基于数量性状对参试种质资源进行聚类分析（图3、表6），结果表明，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，穗粒重最高且着壳率较低，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份农家品种均在此类群，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（21份）、英国（3份）、埃塞俄比亚（1份）等欧洲和非洲的资源。类群II的资源全部来自印度（170份）和日本（12份），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（59份）和墨西哥（23份），共占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。



材料编号同表1

The codes of samples are the same as table 1

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 400 sorghum germplasm resources based on nine quantitative traits

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Number of resources		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

主成分分析通过线性变换可将多个相关变量转换为少数几个相互独立且能尽可能保留原始数据信息的主成分,可用少数的变量因子来概括解释所有的变量信息。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,方差贡献率为33.209%,其中穗长和穗柄长载荷量较高,说明其主要反映穗部性状信息。第2主成分的特征值为1.637,方差贡献率为25.189%,其中穗粒重载荷量最高,说明其主要反映籽粒产量信息。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个主成分的累计贡献率达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	主成分 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

表7（续）

性状 Traits	主成分 Principal components			
	1	2	3	4
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，但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遗传多样性指数略低，分别为1.0366、0.2235、0.6631、0.9619、1.0631和0.9908；穗型、颖壳色、粒色的遗传多样性指数较高，分别为1.3980、1.7641和1.7039。数量性状遗传多样性指数平均值为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2.0479、1.9254、2.0472、1.9822、2.0531、2.0314、2.0693、1.4375和1.9265。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。质量性状中，穗型以中紧和紧型为主，周散和侧散较少；而粒色方面，以白色最多，橙色和黑色最少；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紧密相关，也间接影响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，更适合散穗型高粱生长，因此供试资源大多需要改良后才能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相关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，这与本研究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、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]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,将供试高粱分为3个类群,不同类群高粱在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,可为江苏沿海地区的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。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]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。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] Seshaiah 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. 北京: 中国农业出版社, 1999
Lu Q S. Sorghum science. Beijing: 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(2): 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(2): 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(3): 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(3): 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(3): 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(3): 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(4): 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(4): 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(9): 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(9): 17-20

[9] 刘旭, 李立会, 黎裕, 方沩. 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，2001,2(1)：58-62
Cao W B. A survey of characterization and utilization for Chinese sweet sorghum. Journal of Plant Genetic Resources，2001,2(1)：58-62
［11］ 朱志华，李为喜，刘方，张晓芳，王文真，刘三才，李燕．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，2003,4(4)：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(1)：1-10
Gao X，Feng Z，Ding Y Q，Xu J X，Cao N，Cheng B，Wang C，Zhang L Y. Genetic diversity of agronomic traits of 257 sorghum germplasm resources. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2023，36(1)：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(3)：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(3)：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(8)：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(8)：1887-1890
［16］ 覃初贤，覃欣广，邢钇浩，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
Qin C X，Qin 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(5)：40-51
Wu G J，Zhou W，Yu Z H，Li Y，Lyu 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(5)：40-51
［18］ 牛雪婧，王新栋，王金萍，孙娟，郄彦敏，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(4)：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(4)：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(6)：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(6)：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(3)：654-664
Zhou Y，Li Z B，Huang J，Wu Y，Zhang Y Q，Zhang Z L，Zhang X C. Genetic diversity of sorghum germplasms based on phenotypic traits. Journal of Plant Genetic Resources，2021，22(3)：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(1)：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 germplasms based on major agronomic traits and SSR markers. Crops，2024(1)：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(1)：111-119
Duan G X，Lyu 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(1)：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(5)：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(5)：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，范昕琦，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 Press，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，2008，9(3)：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. Urbana：The University of Illinois Press，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(4)：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(2)：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(3)：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(5)：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(5)：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(4)：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(5)：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(5)：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(1)：99-107
Liu X Y，Liu Z X，Gapar，Slaydin，Ayigamarli J，Guo F. Comprehensive evaluation of sweet sorghum varieties based on principal component silabi analysis and gray relational grade analysis. Xinjiang Agricultural Sciences，2016，53(1)：99-107