

王自力,张北举,李魁印,等.高粱种质资源表型性状多样性分析及综合评价[J].江苏农业科学,2022,50(18):115-121.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.18.018

高粱种质资源表型性状多样性分析及综合评价

王自力¹,张北举¹,李魁印¹,陈松树¹,徐如宏¹,李鲁华¹,吴传喜²,任明见¹

(1. 贵州大学农学院/国家小麦改良中心贵州分中心,贵州贵阳 550025; 2. 桐梓县高粱农业发展有限公司,贵州遵义 563200)

摘要:采用遗传多样性分析、聚类分析、主成分分析以及构建综合评价指标对 152 份不同来源高粱种质资源的 13 个表型性状进行研究。结果表明,供试高粱材料拥有丰富的遗传变异性。变异系数为 7.01%~32.20%,其中直链淀粉含量的变异系数最大,为 32.20%;其次是株高、单宁含量,分别为 31.55%、28.81%。遗传多样性指数为 0.719~2.082,其中单宁、脂肪含量的多样性指数较大,分别为 2.082、2.078;粒形、着壳率的多样性指数较小,分别为 0.719、0.725。供试材料中株高的变异幅度较大,从中初步筛选出 7 份特矮秆和 24 份矮秆资源,可为矮化育种提供亲本材料。当欧氏距离为 7 时,可将 152 份高粱资源划分为 3 个亚类,分别包含 91、55、6 份资源。主成分分析提取的前 6 个主成分因子能够反映 152 份高粱种质资源 78.579% 的多样性信息。通过模糊隶属函数将 6 个主成分的得分进行归一化处理后,基于 6 个主成分的贡献率权重构建综合评价指标: $F = 0.444F_1 + 0.158F_2 + 0.124F_3 + 0.100F_4 + 0.092F_5 + 0.081F_6$,筛选出 10 份综合性状较优的高粱种质资源。本研究结果可为高粱种质创新和新品种选育提供参考依据。

关键词:高粱;种质资源;遗传多样性;聚类分析;主成分分析;综合评价

中图分类号:S514.024 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)18-0115-07

高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] 属于禾本科高粱属,是仅次于小麦、水稻、玉米和大麦的世界第五大谷物^[1]。具有抗旱涝、耐盐碱、耐贫瘠等多重抗逆性和适应性,在农业生产中拥有巨大的发展

空间和产业优势^[2-3]。高粱主要分布在世界五大洲 48 个国家的热带干旱和半干旱地区,温带和寒温带也有种植,蕴藏着丰富的种质资源。在我国高粱是酱香酒酿制的主要原材料,并且还用于生产饲料、纤维、生物燃料等,无论是在粮食安全还是在新能源安全上都具有极其重要的战略意义^[4]。种质资源是作物育种的基础,而进行遗传多样性研究及综合评价对于了解物种遗传背景和评估综合表现具有推动作用,也能为种质筛选和优异性状基因挖掘提供便利。近年来,随着分子生物学的快速发展与应用,科研工作者对于遗传多样性的研究也逐渐进入分子层面^[5-8]。但表型性状鉴定是认识作物种质资源和培育新品种的基石,具有直接、简便等优

收稿日期:2022-05-13

基金项目:贵州省特色杂粮现代农业产业技术体系建设专项(编号:黔财农[2019]15号);贵州省十大工业(优质烟酒)产业振兴专项资金(编号:黔财工[2020]198号);贵州省基层农技推广补助项目(编号:黔财农[2020]294号)。

作者简介:王自力(1999—),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为作物遗传育种。E-mail:473448646@qq.com。

通信作者:任明见,博士,教授,研究方向为高粱、小麦等作物遗传育种。E-mail:rmj72@163.com。

[13]林强,王颖姮,林祁,等.轻简栽培再生稻的产量形成及关键筛选指标[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(10):38-47.

[14]Li J Y, Wang J, Zeigler R S. The 3,000 rice genomes project: new opportunities and challenges for future rice research [J]. GigaScience, 2014, 3(1): 8.

[15]田蕾,陈亚萍,刘俊,等.粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选[J].中国水稻科学,2017,31(6):631-642.

[16]Glaszmann J, Kilian B, Upadhyaya H, et al. Accessing genetic diversity for crop improvement [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2010, 13(2): 167-173.

[17]孙亚东,梁燕,吴江敏,等.番茄种质资源的遗传多样性和聚

类分析[J].西北农业学报,2009,18(5):297-301.

[18]林强,郑长林,林祁,等.再生稻茎比与产量及其构成因素的关系[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(6):65-74,84.

[19]肖人鹏,刘强明,张现伟,等.适宜重庆地区直播中稻蓄留再生稻品种筛选及其丰产性分析[J].南方农业学报,2021,52(1):104-114.

[20]赵经荣,陈宛妹,李增禄,李星华.大豆主要农艺性状的因子分析[J].大豆科学,1991,10(1):24-30.

[21]张彩英,常文锁,谢令琴,等.小麦高代新品系鉴定的聚类分析[J].植物遗传资源科学,2001,2(4):29-33.

[22]赵璐,杨治伟,邵丽群,等.宁夏和新疆水稻种质资源表型遗传多样性分析及综合评价[J].作物杂志,2018(1):25-34.

点^[9]。目前,已有在燕麦^[10]、谷子^[11]、水稻^[12]、陆地棉^[13]、海岛棉^[14]、青稞^[15]、花生^[16]等作物上进行表型性状遗传多样性分析及综合评价的相关报道,但对高粱相关方面的研究却鲜见报道。因此,本研究通过对 152 份不同来源高粱种质资源的 13 个表型性状进行研究,并通过遗传多样性分析、聚类分析、主成分分析以及构建高粱资源综合评价指标,筛选出综合表现优异的高粱种质,以期为高粱种质创新和新品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用的 152 份不同来源的高粱资源,由中国农业科学院作物科学研究所提供(表 1)。包括 76 份国内高粱资源:其中山西省 38 份、辽宁省 9 份、云南省 7 份、河北省 6 份、陕西省 5 份、甘肃省 4 份、河南省 2 份、安徽省、北京市、黑龙江省、山东省、四川省各 1 份;76 份国外高粱资源:其中美国 20 份、印度 13 份、日本 12 份、不详 9 份、墨西哥 8 份、西德 6 份、英国 2 份、泰国 2 份、北也门、法国、捷克、匈牙利各 1 份。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 于 2019—2020 年、2020—2021 年在贵州大学国家小麦改良中心贵州分中心仁怀试验基地进行种植(数据取 2 年均值)。试验采取完全随机区组设计,每小区种植 10 份材料,每份材料播种 3 行,每行 10 穴,每穴各播 2 粒种子,行距、株距均为 50 cm,在每个重复小区中随机取 5 株进行性状调查。

1.2.2 指标测定 试验调查 152 份高粱种质资源的 13 个性状,调查标准参考《高粱种质资源描述规范和数据标准》^[17],性状包括株高、茎粗、穗长、穗形、穗型、粒色、粒形、着壳率。高粱籽粒中的蛋白质、脂肪和单宁含量利用近红外谷物分析仪(Infratec™ 1241 型,丹麦 FOSS)将每个品种重复测量 3 次取平均值,直链淀粉和支链淀粉含量的测定参考 GB 7648—1987 和 GB/T15683—2008^[18]标准进行(部分步骤稍有改进)。

1.3 数据分析

采用 Excel 2021 进行变异系数、遗传多样性指数的计算,对不同来源高粱种质资源的质量性状进行分级描述以分析不同性状类型的频率分布和遗传多样性指数;数量性状利用平均数(\bar{X})和标准差

(S)将材料划分为 10 级,从第 1 级 $X_i \leq (\bar{X} - 2S)$ 到第 10 级 $X_i \geq (\bar{X} + 2S)$,每 0.5 S 为 1 级,每组的相对频率用来计算多样性指数^[19]。Shannon - weaver 遗传多样性指数^[20]公式: $H' = -P_i \times \ln P_i$,其中 P_i 为某一性状第 i 级别时的频率;采用 Oringin 2021 进行聚类分析;采用 IBM SPSS 26 进行主成分分析,计算各主成分得分和综合得分进行综合评价。利用模糊隶属函数将各主成分得分定义到 $[0, 1]$ 区间内,公式为 $\mu(X_i) = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)^[11]。式中: $\mu(X_i)$ 为某种质材料第 i 个性状的隶属函数值; X_i 为某种质材料的第 i 个性状值; $X_{i\max}$ 、 $X_{i\min}$ 分别为所有种质资源中第 i 个性状的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 高粱种质资源遗传多样性分析

2.1.1 质量性状的频率分布和多样性指数 对 152 份高粱种质资源的 5 个质量性状进行统计分析(表 2)发现,各性状之间的遗传多样性指数变化范围为 0.719 ~ 1.267,平均值为 0.89。其中穗型的遗传多样性指数最大,为 1.267;粒形的遗传多样性指数最小,为 0.719;其他性状的多样性指数排序为穗形 > 粒色 > 着壳率。穗形以纺锤形的资源最多,帚形的资源最少;穗型以散型最多,中散型资源最少;粒色频率分布的离散性最高,其中红色籽粒的高粱资源最丰富,黄色和浅黄色资源均较少;粒形以椭圆形资源最多,卵形资源最少。着壳率低的资源占总资源的 74%,而着壳率高的资源仅占 7%。由此可见,152 份高粱种质以纺锤形、散穗、红色、椭圆形和着壳率低的资源居多。

2.1.2 数量性状的主要参数和多样性指数 对 152 份高粱种质资源的 8 个数量性状进行统计分析(表 3)发现,各性状之间的变异系数以及遗传多样性指数均存在较大差异。多样性指数范围在 2.018 ~ 2.082 之间,均值为 2.06。其中单宁含量的多样性指数最大,为 2.082;茎粗的多样性指数最小,为 2.018。其余 6 个性状的多样性指数排序为脂肪含量 > 直链淀粉含量 > 支链淀粉含量 > 蛋白质含量 > 株高 > 穗长。由此可见,这些性状有着丰富的遗传多样性。变异系数范围在 7.01% ~ 32.20% 之间,均值为 21.48%。其中直链淀粉含量的变异系数最大,为 32.20%;蛋白质含量的变异系数最小,为 7.01%。其余 6 个性状的变异系数排序为株

表 1 供试 152 份高粱种质资源名称与产地

序号	品种名称	原产地	序号	品种名称	原产地	序号	品种名称	原产地
1	二铺粒	山西定襄	52	IS-529	印度	103	Tx2761 (red seed)	墨西哥
2	黑长高粱	甘肃庄浪	53	IS-621	印度	104	Tx95406 × CS3541-1	墨西哥
3	北京红 106-2	北京	54	IS-634	印度	105	1391B	墨西哥
4	关东青	河北承德	55	IS-837	印度	106	3018MR4 red seed (4671)	墨西哥
5	关东青	河北秦皇岛	56	IS-6965 (c)	印度	107	墨采 B	墨西哥
6	红八尺杆	河北承德	57	IS-18681	印度	108	ku × 305 (1979R)	泰国
7	红壳关东青	河北卢龙	58	IS-24989	印度	109	ku3218	泰国
8	红高粱	河北廊坊	59	M 55843	印度	110	A 2803	美国
9	红蛇眼	河北承德	60	M-62689	印度	111	Capsack	美国
10	千斤红	山西保德	61	M-67806	印度	112	Darso ok #1	美国
11	马兰红	山西太谷	62	Sudan 56/25	印度	113	IS-2477C	美国
12	木鸽窝	山西汾阳	63	EARLY HEGARL	日本	114	IS-2662C	美国
13	木鸽巢	山西太原	64	甘 6513	甘肃甘谷	115	IS-2757C	美国
14	中秆高粱	山西长治	65	早熟黑格棒	甘肃天水	116	IS-3464C	美国
15	长毛红高粱	山西左权	66	黑壳高粱	甘肃庄浪	117	IS-6456C	美国
16	白鹅儿茭	山西太谷	67	甜芦粟	安徽繁昌	118	kansasorongexdurf Dwarf	美国
17	红高粱	山西平遥	68	七片叶	山西和顺	119	Quadsoon	美国
18	圪塔穗	山西清徐	69	软高粱	山西孝义	120	Repl. 2.3 Plot 2.5.3	美国
19	圪塔穗	山西榆社	70	笱帚高粱	山西石楼	121	Ribbon cone georga	美国
20	伞儿穗	山西阳泉	71	散穗高粱	山西榆次	122	S. Sudanense	美国
21	纺穗高粱	山西交城	72	笱帚糜子	辽宁兴城	123	Slandard kafir #71	美国
22	河东高粱	山西离石	73	红长亭子	河南鄢陵	124	Sumac sorgo #1712	美国
23	软茭子	山西武乡	74	二五三	山西陵川	125	TAM 2566	美国
24	临黄高粱	山西昔阳	75	千斤锤	山西沁水	126	Tx-378B	美国
25	离石黄	山西榆次	76	打锣锤	山西安泽	127	Tx-2767	美国
26	破鞋穗	山西清徐	77	西北高粱	山西隰县	128	Waxy sooner	美国
27	高粱	山西介休	78	珍珠帘	山西闻喜	129	Zi yin	美国
28	黄高粱	山西兴县	79	紫穗高粱	山西稷山	130	美国帚用高粱	北也门
29	黄狼尾	山西原平	80	Dinderawn	西德	131	KSP7-7-22B	不详
30	大黄壳	辽宁法库	81	Early Amber	西德	132	9104B	不详
31	黄罗伞	山西临汾	82	Geke	西德	133	9105B	不详
32	搭茭	山西沁县	83	Romagnolo	西德	134	9108B	不详
33	矮脚糯	陕西平利	84	Soave	西德	135	9202B	不详
34	糜搭蒯	陕西绥德	85	Vespa	西德	136	9701A	不详
35	糯高粱	陕西宁陕	86	高秆红高粱	匈牙利	137	95706B	不详
36	糯高粱	陕西柞水	87	B martin	印度	138	9707B	不详
37	大黑壳高粱	云南墨江	88	ICSR 88009	印度	139	9709B	不详
38	小黄壳	辽宁黑山	89	FUJI A	日本	140	达拉牛	中国云南
39	青壳高粱	辽宁抚顺	90	INDIAN AMBER	日本	141	饭高粱	云南宣威
40	料高粱	辽宁朝阳	91	MARTIN	日本	142	黑暴糯高粱	云南广南
41	黄壳散	辽宁法库	92	RANCHER	日本	143	糯高粱	云南宣威
42	绿苗	辽宁阜新	93	SACCALINE	日本	144	甜高粱	山西平陆
43	黑壳	辽宁本溪	94	166015	日本	145	粘高粱	陕西宁陕
44	黑黄棒子	辽宁北镇	95	中津在来	日本	146	低晋 5	中国山西
45	克恢 22 号	黑龙江克山	96	半月当水-2	日本	147	晋铁 2	中国山西
46	黄萼	山东临朐	97	东北在来	日本	148	晋 5-0	中国山西
47	粟壳林林	河南商丘	98	在来种(光岗)	日本	149	特紧 1	中国山西
48	Hybor MV693	英国	99	红棒子	日本	150	粘高粱	四川巫溪
49	Hybor MV726	英国	100	Is-21	墨西哥	151	糯高粱	云南禄丰
50	S. technicum	捷克	101	Is-10586B	墨西哥	152	糯高粱	云南嵩明
51	Sg 2354	法国	102	M-40079B	墨西哥			

表 2 高粱种质资源质量性状的频率分布和多样性指数

性状	频率分布(%)					多样性指数
	1	2	3	4	5	
穗形	0.05(伞形)	0.34(圆筒形)	0.58(纺锤形)	0.04(帚形)		0.961
穗型	0.31(紧)	0.26(中紧)	0.07(中散)	0.36(散)		1.267
粒色	0.04(灰色)	0.03(黄色)	0.80(红色)	0.11(白色)	0.03(浅黄色)	0.760
粒形	0.08(卵形)	0.75(椭圆形)	0.17(圆形)			0.719
着壳率	0.07(高)	0.19(中)	0.74(低)			0.725

表 3 高粱种质资源数量性状的主要参数和多样性指数

性状	变幅	极差	平均值	标准偏差	变异系数(%)	多样性指数
蛋白质含量(%)	8.98~13.22	4.24	10.98	0.77	7.01	2.051
脂肪含量(%)	2.68~5.99	3.31	3.96	0.64	16.16	2.078
单宁含量(%)	0.55~2.96	2.41	1.77	0.51	28.81	2.082
直链淀粉含量(%)	7.58~66.97	59.39	39.88	12.84	32.20	2.076
支链淀粉含量(%)	22.88~50.93	28.05	39.05	5.05	12.93	2.062
株高(cm)	64.00~415.00	351.00	203.02	64.05	31.55	2.047
茎粗(cm)	6.90~18.20	11.30	11.71	2.42	20.67	2.018
穗长(cm)	12.00~42.00	30.00	27.03	6.08	22.49	2.022

高>单宁含量>穗长>茎粗>脂肪含量>支链淀粉含量。一般变异系数大于10%表示样本间差异比较大^[21],本研究中有7个性状(脂肪含量、单宁含量、直链淀粉含量、支链淀粉含量、株高、茎粗、穗长)的变异系数大于10%,表明这些性状离散程度高,遗传差异较大。

152份高粱资源的株高变异幅度较大,最高可达415 cm,最矮仅为64 cm,从中初步筛选出一批优异矮秆种质资源(表4)。供试材料中有7份特矮秆(株高≤100 cm),24份矮秆(株高≤150 cm)^[22]资源,31份矮秆种质均来自国外,这些资源对于选育高粱抗倒伏品种有至关重要的作用。

表 4 高粱矮秆种质资源

性状	材料编号
特矮秆(≤100 cm)	55、57、104、105、116、117、125
矮秆(≤150 cm)	48、49、59、62、91、94、101、102、103、106、107、111、120、126、127、128、132、133、134、135、136、137、138、139

2.2 高粱种质资源聚类分析

通过系统聚类平均法,在欧氏距离为7时,可将152份高粱材料分为3个亚类(图1),具体的数量性状特征见表5。第1类包含91份资源,占有种质资源的59.87%,包括国内73份、国外18份,以

红色、椭圆形资源居多。其主要特征是脂肪含量和支链淀粉含量分别在3个类群中最大,但支链淀粉含量的变异系数排名第2;蛋白质含量、脂肪含量、直链淀粉含量、茎粗、穗长的变异系数分别在3个类群中最高,综合性状较好。第2类包含55份资源,占有种质资源的36.18%,全为国外高粱资源,穗形以纺锤形居多。其主要特征是蛋白质含量、脂肪含量、单宁含量和株高分别在3个类群中最小,但单宁含量和株高的变异系数排名第1;其次直链淀粉含量和茎粗分别在3个类群中最大。第3类包含6份资源,占有种质资源的3.95%,包括国内外高粱资源各3份,以灰色、卵形资源居多。其主要特征是蛋白质含量、单宁含量、株高和穗长分别在3个类群中最大,但蛋白质、单宁含量和穗长的变异系数最低。其中穗长最长(41.00 cm)的是来自北也门的美国帚用高粱。

2.3 高粱种质资源主成分分析及综合评价

利用KMO和Bartlett检验法进行因子适用性检验得到KMO值为0.772(>0.65),Bartlett球形度检验的Sig值为0.00(<0.01),说明该数据可以用于主成分分析。

通过主成分分析将13个性状转换为6个独立的成分因子(表6),特征值分别为4.537、1.609、1.272、1.025、0.942和0.830,方差贡献率分别为

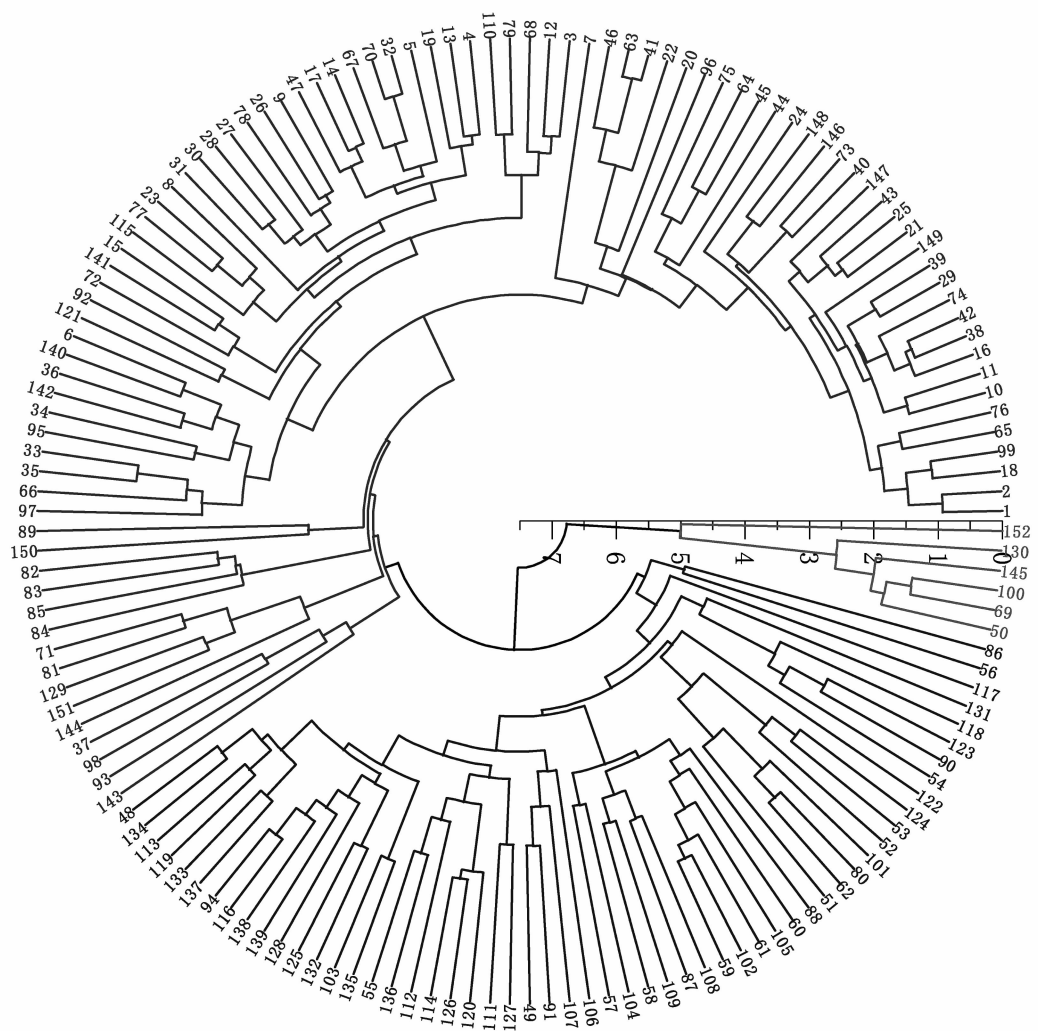


图1 152 份高粱种质聚类分析

表 5 高粱种质资源 3 个类群的数量性状特征

性状	种质类群					
	I		II		III	
	平均数	变异系数(%)	平均数	变异系数(%)	平均数	变异系数(%)
资源数(个)	91		55		6	
蛋白质含量(%)	11.22	6.57	10.48	5.07	11.77	3.02
脂肪含量(%)	4.31	11.99	3.38	10.18	3.94	11.79
单宁含量(%)	2.02	20.81	1.33	24.32	2.12	11.49
直链淀粉含量(%)	34.13	32.02	48.71	21.59	46.24	17.92
支链淀粉含量(%)	40.71	10.32	36.64	14.55	35.89	7.77
株高(cm)	227.09	19.43	151.35	36.50	311.67	8.23
茎粗(cm)	10.75	18.43	13.17	17.98	12.87	9.49
穗长(cm)	28.49	21.45	24.02	19.67	32.33	12.20

表 6 前 6 个主成分的特征值及特征向量描述

性状	成分					
	1	2	3	4	5	6
蛋白质含量	0.709	-0.078	0.220	0.066	0.084	-0.029
脂肪含量	0.807	0.175	-0.127	-0.053	-0.091	0.278
单宁含量	0.693	-0.010	-0.447	0.074	-0.204	0.315
直链淀粉含量	-0.593	-0.315	0.363	-0.095	-0.018	0.189
支链淀粉含量	0.413	0.213	-0.517	-0.048	0.569	-0.265
株高	0.685	-0.169	0.015	-0.123	-0.072	0.430
茎粗	-0.350	-0.084	0.105	0.540	0.585	0.445
穗长	0.605	0.032	0.625	0.100	0.062	-0.056
穗形	-0.108	0.448	-0.088	0.744	-0.406	-0.078
穗型	0.771	0.015	0.272	-0.017	-0.064	-0.100
粒色	-0.633	-0.546	-0.286	0.017	-0.203	0.056
粒形	-0.412	0.740	0.203	-0.156	0.016	0.037
着壳率	-0.496	0.587	-0.035	-0.326	-0.019	0.375
特征值	4.537	1.609	1.272	1.025	0.942	0.830
方差贡献率(%)	34.898	12.380	9.781	7.884	7.247	6.388
累积贡献率(%)	34.898	47.278	57.060	64.944	72.191	78.579

34.898%、12.380%、9.781%、7.884%、7.247% 和 6.388%，累积贡献率达到 78.579%，可以反映出 13 个性状的大部分信息。主成分 1 中脂肪含量的贡献率最大，其次是穗型、蛋白质含量和单宁含量，可以把主成分 1 作为籽粒品质的综合指标。主成分 2 中

粒形的贡献率最大,其次是着壳率,可以作为籽粒外观因子。主成分 3、主成分 4 分别代表穗长、穗形等穗部形态。成分 5 是与茎粗和支链淀粉含量相关的因子。成分 6 中茎粗的贡献率最大,其次是株高,反映的是植株生长信息。

通过高粱种质 13 个表型性状所对应的主成分值为系数构建线性方程:

$$F_1=0.709X_1+0.807X_2+0.693X_3-0.593X_4+0.413X_5+0.685X_6-0.350X_7+0.605X_8-0.108X_9+0.771X_{10}-0.633X_{11}-0.412X_{12}-0.496X_{13};$$
$$F_2=-0.078X_1+0.175X_2-0.010X_3-0.315X_4+0.213X_5-0.169X_6-0.084X_7+0.032X_8+0.448X_9+0.015X_{10}-0.546X_{11}+0.740X_{12}+0.587X_{13};$$
$$F_3=0.220X_1-0.127X_2-0.447X_3+0.363X_4-0.517X_5+0.015X_6+0.105X_7+0.625X_8-0.088X_9+0.272X_{10}-0.286X_{11}+0.203X_{12}-0.035X_{13};$$
$$F_4=0.066X_1-0.053X_2+0.074X_3-0.095X_4-0.048X_5-0.123X_6+0.540X_7+0.100X_8+0.744X_9-0.017X_{10}+0.017X_{11}-0.156X_{12}-0.326X_{13};$$

$$F_5=0.084X_1-0.091X_2-0.204X_3-0.018X_4+0.569X_5-0.072X_6+0.585X_7+0.062X_8-0.406X_9-0.064X_{10}-0.203X_{11}+0.016X_{12}-0.019X_{13};$$
$$F_6=-0.029X_1+0.278X_2+0.315X_3+0.189X_4-0.265X_5+0.430X_6+0.445X_7-0.056X_8-0.078X_9-0.100X_{10}+0.056X_{11}+0.037X_{12}+0.375X_{13}。$$

式中: $X_1 \sim X_{13}$ 分别表示蛋白质含量、脂肪含量、单宁含量、直链淀粉含量、支链淀粉含量、株高、茎粗、穗长、穗形、穗型、粒色、粒形、着壳率的标准化值。利用模糊隶属函数将 6 个主成分的得分进行归一化处理后,计算 6 个主成分的贡献率权重(0.444、0.158、0.124、0.100、0.092、0.081)构建用于筛选高粱优异种质的综合得分 F 值,则 F 值= $0.444F_1+0.158F_2+0.124F_3+0.100F_4+0.092F_5+0.081F_6$ 。其中 F 值的大小能够初步表明该种质资源综合性状的优劣程度。经计算,152 份供试高粱种质的平均综合得分为 0.527,序号为 152(0.822)、37(0.809)和 98(0.808)等 10 份品种的综合得分较大(表 7),说明这些品种相比其他品种综合性状较优。

表 7 10 份优异高粱种质资源的综合得分

序号	品种名称	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F 值	排名
152	糯高粱	0.964	0.827	0.606	0.987	0.296	0.771	0.822	1
37	大黑壳高粱	0.863	0.594	0.662	0.932	0.821	1.000	0.809	2
98	在来种	0.932	0.748	0.272	0.915	0.880	0.858	0.808	3
143	糯高粱	0.987	0.772	0.444	0.790	0.470	0.624	0.788	4
150	粘高粱	0.994	0.371	0.657	0.503	0.429	0.875	0.742	5
130	美国帚用高粱	1.000	0.372	0.886	0.442	0.420	0.285	0.719	6
66	黑壳高粱	0.865	0.753	0.401	0.656	0.432	0.571	0.704	7
35	糯高粱	0.794	0.765	0.400	0.761	0.566	0.560	0.696	8
140	达拉牛	0.921	0.535	0.244	0.568	0.601	0.690	0.692	9
3	北京红 106-2	0.873	0.429	0.669	0.462	0.510	0.598	0.680	10

3 讨论与结论

遗传多样性是进行遗传研究的基础,通过对种质资源进行遗传多样性分析可以从整体上把握种质的应用潜力以及利用价值。本研究通过遗传多样性分析发现质量性状的多样性指数值为 0.719~1.267,均值为 0.89。其中穗型的多样性指数值最大,为 1.267,其次是穗形和粒色。与赵香娜等对甜高粱种质资源研究得出粒色遗传多样性最高的结果^[19,23]有所不同,可能是由于试验材料的差异造成的。数量性状的变异系数为 7.01%~32.20%,其中直链淀粉含量、株高、单宁含量的变异系数较大,分别为 32.20%、31.55%、28.81%。遗传多样性指

数为 2.018~2.082,均值为 2.06,其中遗传多样性指数较大的有单宁含量为 2.082,脂肪含量为 2.078,直链淀粉含量为 2.076。数量性状的遗传多样性明显大于质量性状,这与周瑜等研究结果^[9,24-25]相同。研究结果说明供试材料拥有较大的遗传差异,这有利于拓宽遗传基础以及高粱优异种质的筛选。

聚类分析是将未知类别的样本按照一定的规则划分成若干个类簇,把相似(距离相近)的样本聚在同一个类簇,不相似的样本分为不同类簇,从而揭示样本之间内在的性质以及相互之间的联系规律。本研究通过聚类分析将 152 份不同来源的高粱种质划分为 3 个亚类,第 1 类主要特征为中秆、脂肪

和支链淀粉含量高,综合性状较优,可作为优质资源创新利用;第2类主要特征为矮秆、茎粗、直链淀粉含量高,单宁含量低,可作为矮秆育种和食品工业的资源;第3类主要特征为高秆、穗长,可从中筛选适合工艺制品(帚等)的资源。不同类群间遗传差异相对较大,可在品种改良过程中起到优势互补的作用,该分类结果可为不同育种目标选种提供参考和选择依据。

主成分分析是利用降维的思想来简化原有信息的工作量,通常用于分析最多样化领域的数据^[14,26-27]。本研究通过主成分分析发现,提取出的前6个主成分因子能够反映出籽粒品质、籽粒外观、穗部形态和植株生长特性等大部分信息,可以有效降低数据冗余,简化工作量。依据各个性状在主成分中的贡献率权重来计算综合得分(F 值),按照得分大小进行筛选,将各种质资源的综合性状表现数据化,有效降低了主观误差,提高了评价的准确率^[28]。此方法已在多种作物^[10-16]中进行应用,因此采用综合得分对高粱种质资源进行评价是较为可靠的。

参考文献:

- [1] Espitia - Hernández P, Chávez González M L, Ascacio - Valdés J A, et al. Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(8): 2269 - 2280.
- [2] 倪先林, 赵甘霖, 刘天朋, 等. SSR 分子标记在糯高粱种质资源遗传多样性分析中的应用[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 16 - 22.
- [3] 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[J]. 山西农业科学, 2015, 43(4): 378 - 382.
- [4] 白文斌, 张福跃, 焦晓燕, 等. 中国高粱产业工程技术研究的定位思考[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 107 - 110.
- [5] Zhou R, Wu Z, Cao X, et al. Genetic diversity of cultivated and wild tomatoes revealed by morphological traits and SSR markers [J]. Genetics and Molecular Research, 2015, 14(4): 13868 - 13879.
- [6] Würschum T, Langer S M, Longin C F H, et al. Population structure, genetic diversity and linkage disequilibrium in elite winter wheat assessed with SNP and SSR markers [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2013, 126(6): 1477 - 1486.
- [7] Verma H, Borah J L, Sarma R N. Variability assessment for root and drought tolerance traits and genetic diversity analysis of rice germplasm using SSR markers [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16513.
- [8] Basahi M. ISSR - based analysis of genetic diversity among sorghum landraces growing in some parts of Saudi Arabia and Yemen [J]. Comptes Rendus Biologies, 2015, 338(11): 723 - 727.
- [9] 加依娜·吾永巴衣, 胡文明, 阿迪里·托乎尼亚孜, 等. 基于质量和数量性状混合的高粱遗传多样性分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 73 - 76.
- [10] 耿小丽, 张 榕, 张少平, 等. 130 份燕麦种质表型性状多样性分析及评价[J]. 草业科学, 2020, 37(10): 2022 - 2034.
- [11] 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[J]. 作物学报, 2016, 42(1): 19 - 30.
- [12] 胡标林, 万 勇, 李 霞, 等. 水稻核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 829 - 839.
- [13] 代攀虹, 孙君灵, 何守朴, 等. 陆地棉核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2016, 49(19): 3694 - 3708.
- [14] 杨 涛, 黄雅婕, 李生梅, 等. 海岛棉种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2499 - 2509.
- [15] 白羿雄, 郑雪晴, 姚有华, 等. 青稞种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4201 - 4214.
- [16] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 等. 花生种质资源表型性状的综合评价及指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2018, 19(5): 865 - 874.
- [17] 陆 平. 高粱种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [18] 张北举, 陈松树, 李魁印, 等. 基于近红外光谱的高粱籽粒直链淀粉、支链淀粉含量检测模型的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2022, 55(1): 26 - 35.
- [19] 赵香娜, 李桂英, 刘 洋, 等. 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[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(3): 302 - 307.
- [20] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3 - 55.
- [21] 田朋佳, 廖文华, 高小丽, 等. 140 份西藏大麦种质资源遗传多样性分析[J]. 西南农业学报, 2022, 35(1): 16 - 26.
- [22] 陈冰嬌, 李继洪, 王 阳, 等. 高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) *moench*] 种质资源研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 67 - 72, 77.
- [23] 王继师, 刘祖昕, 樊 帆, 等. 24 个甜高粱品种主要农艺性状与品质性状遗传多样性分析[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 83 - 91.
- [24] 周 瑜, 李泽碧, 黄 娟, 等. 高粱种质资源表型性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(3): 654 - 664.
- [25] 冯国郡, 李宏琪, 叶 凯, 等. 甜高粱种质资源在新疆的多样性表现及聚类分析[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(3): 398 - 405.
- [26] Gewers F L, Ferreira G R, de Arruda H F, et al. Principal component analysis: a natural approach to data exploration [EB/OL]. 2018: arXiv: 1804. 02502. <https://arxiv.org/abs/1804.02502>
- [27] 王治会, 岳翠男, 李 琛, 等. 江西省茶树种质化学特性多样性分析与鉴定评价[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 172 - 179.
- [28] 要燕杰, 高 翔, 吴 丹, 等. 小麦农艺性状与品质特性的多元分析与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(1): 38 - 47.