

高粱抗旱种质筛选及遗传多样性的 SSR 分析

王 瑞¹, 张福耀¹, 王花云¹, 詹鹏杰¹, 于纪珍¹, 凌 亮²

(¹山西省农业科学院高粱研究所/农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室, 榆次 030600;

²山西省农业科学院食用菌研究所, 太原 030031)

摘要: 对 61 份高粱育种材料进行了抗旱性鉴定, 旨在筛选既有较好抗旱性能又具较高丰产性能的高粱种质供育种利用。本研究筛选出抗旱性 3 级以上的材料 14 份, 其中 1 级抗旱材料 2 份。选用 109 对 SSR 引物对 61 份高粱种质进行了遗传多样性分析, 结果表明 51 对引物有较好的多态性, 共扩增到 508 个等位变异片段, 平均每个标记获得 10 个等位基因, 多态性信息量 (PIC) 值平均为 0.6615, 变幅 0.0322~0.9134。聚类分析结果表明, 61 份高粱材料聚成 4 类, 聚类结果与根据地理来源、遗传背景的分类结果基本一致。中国高粱恢复系之间的遗传距离较近, 说明我国目前的恢复系材料遗传基础狭窄, 应在育种中拓宽恢复系的遗传基础。

关键词: 高粱; 抗旱性; SSR 标记; 遗传多样性

Drought Resistance Screening and Genetic Diversity by SSR Markers in Sorghum

WANG Rui¹, ZHANG Fu-yao¹, WANG Hua-yun¹, ZHAN Peng-jie¹, YU Ji-zhen¹, LING Liang²

(¹Sorghum Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Yuci 030600;

²Institute of Edible Fungi, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031)

Abstract: Sixty-one sorghum germplasm resources were evaluated on dry and irrigated land in order to identify those with high drought resistance and superior yield performance for sorghum breeding. The results showed that 14 materials were drought resistant above grade 3, of which 2 were grade 1. Meanwhile, in order to study the genetic variation of sorghum at molecular level, 109 simple sequence repeat (SSR) markers were explored to characterize those germplasm resources. The results revealed that 51 pairs of SSR markers were highly polymorphic, and 508 alleles were amplified with the average of 10 alleles per marker. The mean polymorphism information content (PIC) was 0.6615 with an range from 0.0322 to 0.9134. The sorghum materials were classified into 4 groups based on the SSR experiments. The clustered results were similar with those based on geographical origins and genetic backgrounds. Genetic distances among chinese sorghum restorers were relatively close that indicating they had a narrow genetic basis. It was suggested that the genetic basis of the restorer lines should be broaden in future breeding program.

Key words: sorghum; drought resistance; simple sequence repeat marker; genetic diversity

干旱是人类长期面临的问题, 是导致农作物减产和其他次生灾害发生的主要原因之一, 如何面对

和解决干旱问题是我国农业可持续发展面临的严峻考验。发展节水农业, 培育和选择抗旱品种是解决

收稿日期: 2013-09-06 修回日期: 2013-11-15 网络出版日期: 2014-06-09

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20140609.1430.025.html>

基金项目: 现代农业产业技术体系 (CARS-06-01-01); 山西省农科院育种基础项目 (Yyzjc1105)

第一作者主要从事高粱分子生物学方面的研究。E-mail: wangrui989@163.com

通信作者: 张福耀, 主要从事高粱遗传育种研究。E-mail: zfy5607@163.com

干旱地区水资源不足的主要途径^[1-3]。高粱是世界第 5 大谷类作物,具有耐旱、耐涝、耐贫瘠、耐盐碱等多重抗性,在旱作农业中发挥了重要作用,即便如此,干旱仍是高粱生产持续稳定发展的最主要限制因子之一^[4-6]。因此,研究高粱耐旱性仍然是高粱育种的重要内容。20 世纪 80 年代初,山西省农业科学院高粱研究所曾采用抗旱系数法对 1009 份中国高粱种质资源进行了抗旱鉴定筛选^[7],中国农业科学院对中国高粱种质资源进行了苗期抗旱鉴定^[8],但这些鉴定均以单纯评价抗旱性为主,筛选的材料性状差、产量性能低,育种家很少利用。为了筛选既有较好抗旱性能又具较高丰产性能的高粱种

质,为育种提供优良抗旱材料,本研究对中国高粱骨干亲本系和育种材料进行了抗旱鉴定筛选,并对筛选出的抗旱材料进行了遗传多样性的 SSR 分析,试图从分子生物学角度进一步了解高粱抗旱材料的遗传多样性,为抗旱亲本选配和抗旱育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用遗传稳定的国内外高粱育种材料和骨干亲本系共 61 份(表 1),其中,国内的 38 份,来源于美国的 14 份、印度的 9 份。

表 1 供试高粱材料

Table 1 The sorghum germplasm resources used in this study

编号 No.	材料名称 Name	类型 Type	来源 Origin	编号 No.	材料名称 Name	类型 Type	来源 Origin	编号 No.	材料名称 Name	类型 Type	来源 Origin
1	BTx3197	保持系	美国	22	T ₁₂ S ₃ A-1/ L92899-R473-2	恢复系	中国	42	Ho275	保持系	印度
2	BTx378	保持系	美国	23	L220	恢复系	中国	43	Ho277	保持系	印度
3	BTx623	保持系	美国	24	Tx7078	保持系	美国	44	Ho447	保持系	印度
4	BV ₄	保持系	印度	25	B35	保持系	美国	45	Ho260	保持系	印度
5	A ₂ 7050	不育系	印度	26	黑 Tx430	保持系	美国	46	Sc499-14E	恢复系	美国
6	B ₂ 7050	保持系	印度	27	三尺三	恢复系	中国	47	Sc240-14E	恢复系	美国
7	BTx623 bmr6	保持系	美国	28	晋辐 1 号	恢复系	中国	48	34-33-2	恢复系	中国
8	A 泸 45	不育系	中国	29	R111	恢复系	中国	49	Tx432	保持系	美国
9	B 泸 45	保持系	中国	30	晋梁 5 号	恢复系	中国	50	R9188	保持系	美国
10	AE35/糖	A ₃ 不育系	中国	31	1383-2	恢复系	中国	51	1877/J7654	恢复系	中国
11	BE35/糖	保持系	中国	32	SX-30	恢复系	中国	52	A ₃ R0-30/0-30 黑三	恢复系	中国
12	A ₂ 早 B/Tx623-11B	保持系	中国	33	363C/2691	恢复系	中国	53	L9198/TMS	保持系	中国
13	A ₂ 早 B/Tx623-5B	保持系	中国	34	Sug 中秆	恢复系	中国	54	0-30	恢复系	中国
14	BSX44	保持系	中国	35	Sug 高秆	恢复系	中国	55	53H	恢复系	中国
15	0-01	恢复系	中国	36	B6-6	保持系	中国	56	吉 7029	恢复系	中国
16	038R	恢复系	中国	37	TAM428	保持系	美国	57	L 黑-4/吉 7031-2	恢复系	中国
17	103R	恢复系	中国	38	HC356	恢复系	中国	58	吉 7030-4	恢复系	中国
18	035R	恢复系	中国	39	B232E	保持系	美国	59	冀蚜 2 号	保持系	中国
19	16R	恢复系	中国	40	BTx7000	保持系	美国	60	741324	恢复系	中国
20	L2381-1	恢复系	中国	41	961547	恢复系	印度	61	E35-1	保持系	印度
21	TC1383-2-1	恢复系	中国								

1.2 抗旱性鉴定

1.2.1 抗旱性鉴定方法 试验在山西榆次进行,该区年降雨量平均 430 mm,属半干旱地区,每年在高粱生长的苗期和中后期均会出现干旱,所以采用了田间自然鉴定法对品种抗旱能力进行鉴定评价。试

验田有灌溉条件,播前统一灌水,生育期间设置水、旱 2 种处理,干旱处理完全靠自然降水,对照在拔节期和抽穗期进行灌溉补水。为了防止株高不同对矮秆材料造成的影响,试验设 2 个组,不育系和低秆材料为 A 组,恢复系及高秆材料为 B 组,田间随机区

组设计,3 次重复。

1.2.2 抗旱性评价方法与指标 试验通过农业抗旱指标来分析品种的抗旱性。主要以产量及其变化为依据,评价品种的抗旱性^[5]。其评价方法为抗旱指数(DRI, drought resistance index)法^[9],即抗旱指数 = 品种的旱地产量 × 某品种的抗旱系数/旱地平均产量。评价标准见表 2。

表 2 全生育期的抗旱性评价标准

Table 2 Criteria for evaluating drought resistance in sorghum during the whole growth period

抗旱级别 Grade	抗旱指数 DRI	抗旱性 Drought resistance
1	≥1.3000	极强(HR)
2	1.1000 ~ 1.2999	强(R)
3	0.9000 ~ 1.0999	中等(MR)
4	0.7000 ~ 0.8999	弱(S)
5	≤0.6999	极弱(HS)

1.3 多态性分析

1.3.1 SSR 标记分析 根据文献[10]中 SSR 引物情况,通过聚丙烯酰胺凝胶电泳筛选出具有单一扩增产物、均匀分布于高粱的 10 个连锁群上、具有较高多态性的 SSR 引物 51 对,用荧光引物检测标记,分析各材料的基因型。取幼苗叶片,采用酚-氯仿法^[11]提取 DNA。PCR 扩增采取 15 μL 体系,包括:8.08 μL H₂O;1.5 μL 10 × Buffer(Mg²⁺);0.12 μL

dNTP(25 mmol/L);0.1 μL *Taq*(5 U/μL);0.2 μL Primer1(携带 M13 尾巴)(4 mmol/L);1 μL Primer2(4 mmol/L);0.8 μL M13(4 mmol/L);2 μL DNA(20 ng/μL)。PCR 反应程序:94 °C 预变性 5 min;30 个循环(94 °C 变性 45 s,退火温度 45 °C,72 °C 延伸 45 s);8 个循环(94 °C 变性 45 s,53 °C 退火 45 s,72 °C 延伸 45 s);72 °C 延伸 10 min;15 °C 保存。PCR 反应在 PTC-225(MJ Research)基因扩增仪上运行。扩增产物经纯化后在 ABI3730XL 测序仪上进行毛细管电泳,利用 Genemapper 3.1 软件进行数据收集,并根据引物筛选时确定的分子量范围及引物的颜色进行条带分子量的确定^[12]。

1.3.2 数据统计处理 用 Powermarker 3.25^[13] 软件分析等位变异数和多态性信息含量(PIC, polymorphism information content)。利用 DARwin 5.0 软件对供试材料进行聚类。

2 结果与分析

2.1 抗旱性鉴定

A 组抗旱鉴定结果表明,抗旱指数达 0.9 以上的材料有 8 份。其中, BE35/糖和 A₂早 B/Tx623-5B 抗旱指数分别为 1.34 和 1.31,达 1 级抗旱水平;达 2 级的材料有 4 份,分别是 961547、黑 Tx430、B35 和 BSX44;达 3 级的有 BTx3197 和 BTx623。从抗旱系数看,B35 的抗旱系数最大,达到 0.95(表 3)。

表 3 A 组抗旱鉴定抗旱 3 级以上材料

Table 3 Materials with drought resistance above grade 3 in group A

名称 Name	穗粒重(g) Grain weight per panicle		抗旱系数 Drought resistance ratio	旱地平均穗粒重 Average grain weight per panicle in dry land	抗旱指数 DRI	等级评价 Grade
	旱地 Dry land	水地 Irrigated land				
	BE35/糖	46.13				
A ₂ 早 B/Tx623-5B	41.14	45.05	0.91	28.65	1.31	1
961547	39.28	43.79	0.90	28.65	1.23	2
黑 Tx430	40.45	47.00	0.86	28.65	1.22	2
B35	36.44	38.17	0.95	28.65	1.21	2
BSX44	36.51	39.84	0.92	28.65	1.17	2
BTx3197	34.94	43.54	0.80	28.65	0.98	3
BTx623	36.29	48.01	0.76	28.65	0.96	3

从 B 组的鉴定结果看,抗旱性能明显比 A 组差,未筛选出 1 级抗旱材料,抗旱性达 2 级的材料有 5 份,分别是 363C/2691、0-01、Ho277、103R 和 53H;3 级材料 1 份,是 L2381-1(表 4)。

试验共筛选出抗旱性强(3 级)的材料 14 份。从材料来源看,38 份来源于中国的高粱材料,抗旱达 1 级的 2 份,占供试材料的 5.3%,2 级 4 份,占 10.5%,3 级 1 份,占 2.6%;来源于美国的 14 份高粱

表 4 B 组抗旱鉴定抗旱 3 级以上材料

Table 4 Materials with drought resistance above grade 3 in group B

名称 Name	穗粒重(g) Grain weight per panicle		抗旱系数 Drought resistance ratio	旱地平均穗粒重 Average grain weight per panicle in dry land	抗旱指数 DRI	等级评价 Grade
	旱地 Dry land	水地 Irrigated land				
363C/2691	47.44	51.30	0.92	34.05	1.29	2
0-01	47.44	54.74	0.87	34.05	1.21	2
Ho277	51.39	64.32	0.80	34.05	1.21	2
103R	49.44	64.74	0.76	34.05	1.11	2
53H	51.67	70.88	0.73	34.05	1.11	2
L2381-1	44.66	61.77	0.72	34.05	0.95	3

材料中,未发现 1 级抗旱材料,抗旱达 2 级的共 3 份,占供试材料的 21.4%,3 级材料 2 份,占 14.3%; 参试印度材料共 9 份,也未发现 1 级抗旱材料,抗旱达 2 级的共 2 份,占供试材料的 22.2%。从 3 个不

同来源的参试材料看,国外材料中均未发现 1 级抗旱材料,但从 2、3 级抗旱材料看,国外材料所占的百分比比较国内材料高(表 5)。

表 5 不同国家来源材料抗旱性表现

Table 5 Drought resistance performance among various materials from different countries

来源 Origin	1 级 Grade 1		2 级 Grade 2		3 级 Grade 3		4 级 Grade 4		5 级 Grade 5	
	份数	占总数(%)	份数	占总数(%)	份数	占总数(%)	份数	占总数(%)	份数	占总数(%)
	Number	Percentage	Number	Percentage	Number	Percentage	Number	Percentage	Number	Percentage
中国	2	5.3	4	10.5	1	2.6	13	34.2	18	47.4
美国	0	0	3	21.4	2	14.3	5	35.7	4	28.6
印度	0	0	2	22.2	0	0	2	22.2	5	55.6

2.2 多态性分析

对 61 份高粱育种材料和骨干亲本系进行遗传多样性分析结果见表 6。51 对 SSR 引物在 61 份高粱品种中共检测出 508 个等位基因,平均每个标记获得 10 个等位基因,每个标记扩增等位基因数介于 2~24。引物 Xtxp331 检测出等位基因数最多,为 24 个,其次是 Xtxp230 检测到 21 个, Xtxp207 和 Xtxp208 最少,为 2 个,大部分引物的等位基因数在 5~12 范围内。51 对引物的主要等位基因频率平均为 0.4306, Xtxp33 最低,为 0.1379; Xtxp207 最高,为 0.9833。基因多样性则以 Xtxp207 最低,为 0.0328; Xtxp331 最高,为 0.9186,平均 0.6878。51 对引物的 PIC 值变幅较大, Xtxp207 最低,为 0.0322; Xtxp331 最高,为 0.9134,平均值为 0.6615。这说明所选的 51 对 SSR 引物在 61 个供试高粱品种上的多态性水平相对较高。

2.3 聚类分析

基于遗传距离 0.5638 处将 61 份供试材料分为 4 大类群(图 1)。类群 I 全部为国内材料,均为恢复系类型。类群 II 为国外种质和部分国外材料改良

系,除 BE35/糖、AE35/糖、E35-1 等 3 个恢复材料外,均为 A₁、A₂ 的保持类型材料。类群 III 为在 A₃ 细胞质背景下恢复的种质,包括 Sc240-14E、Sc499-14E。类群 IV 为甜高粱种质,包括 Sug 高秆、Sug 中秆。

SSR 标记对 61 份参试材料的聚类结果表明,参试高粱种质亲缘关系的远近与来源有较密切关系,同一来源的品种多被聚为一类。另外,从高粱的类型来看,恢复系(A₁、A₂)大多被聚为一类,A₁、A₂ 的不育系和保持系被聚为另一类。2 个 A₃ 的恢复系聚为一类,2 个甜高粱品种聚为一类,亲缘关系的远近与遗传背景也较紧密。

从参试材料间的遗传距离看,61 份材料的遗传距离值范围为 0.1~0.9011,平均为 0.6941,遗传距离最小的是 363C/2691 与 A₃R0-30/0-30 黑三,遗传距离值仅有 0.1122, BV₄ 与 34-33-2 之间遗传距离最大,为 0.9011。从恢复系和不育系 2 大类群看,类群 1 的遗传距离值范围为 0.1122~0.6391,平均为 0.5137,类群 2 的遗传距离值范围为 0.1~0.8178,平均为 0.6516。由此可看出,恢复系与保持系相比遗传基础较狭窄,应在育种中拓宽恢复系的遗传基础。

表 6 51 对 SSR 引物在 61 份供试材料中的扩增

Table 6 Amplification in 61 tested varieties by 51 SSR primes

引物 Primer	等位基因频率 Allelic frequency	等位基因数 No. of allele	基因多样性 Gene diversity	多态性信息量 <i>PIC</i>	引物 Primer	等位基因频率 Allelic frequency	等位基因数 No. of allele	基因多样性 Gene diversity	多态性信息量 <i>PIC</i>
Xtxp1	0.1803	16	0.8948	0.8859	Xtxp211	0.2377	10	0.8461	0.8284
Xtxp3	0.4667	11	0.7399	0.7200	Xtxp212	0.5410	6	0.6160	0.5593
Xtxp7	0.4426	7	0.6385	0.5703	Xtxp225	0.4068	8	0.7139	0.6685
Xtxp8	0.2705	16	0.8729	0.8626	Xtxp229	0.7705	5	0.3859	0.3615
Xtxp12	0.2459	14	0.8576	0.8427	Xtxp230	0.1525	21	0.9032	0.8955
Xtxp14	0.4016	10	0.7533	0.7213	Xtxp231	0.9180	5	0.1553	0.1522
Xtxp15	0.4333	8	0.7418	0.7122	Xtxp265	0.2049	12	0.8748	0.8629
Xtxp17	0.4426	7	0.7208	0.6844	Xtxp267	0.3279	9	0.7982	0.7719
Xtxp18	0.1583	16	0.8976	0.8888	Xtxp284	0.2705	11	0.8402	0.8222
Xtxp19	0.2377	17	0.8584	0.8445	Xtxp289	0.8033	4	0.3397	0.3202
Xtxp21	0.5738	9	0.6242	0.5922	Xtxp294	0.3559	6	0.7475	0.7070
Xtxp23	0.4262	8	0.7251	0.6874	Xtxp295	0.4407	10	0.7239	0.6897
Xtxp31	0.2623	16	0.8718	0.8609	Xtxp296	0.3417	10	0.7501	0.7098
Xtxp33	0.1379	15	0.9120	0.9053	Xtxp298	0.1667	14	0.8907	0.8808
Xtxp40	0.9344	5	0.1254	0.1228	Xtxp302	0.6500	9	0.5522	0.5305
Xtxp43	0.2869	10	0.8202	0.7979	Xtxp303	0.4833	6	0.6806	0.6372
Xtxp45	0.6346	11	0.5764	0.5592	Xtxp312	0.4180	12	0.7816	0.7650
Xtxp88	0.5410	5	0.5386	0.4395	Xtxp316	0.2542	16	0.8615	0.8485
Xtxp141	0.2213	9	0.8581	0.8422	Xtxp320	0.4083	13	0.7883	0.7718
Xtxp145	0.4237	10	0.7331	0.6996	Xtxp321	0.9727	3	0.0534	0.0526
Xtxp149	0.5410	3	0.5112	0.3962	Xtxp327	0.3333	12	0.7871	0.7587
Xtxp159	0.2328	9	0.8395	0.8196	Xtxp329	0.3934	14	0.8019	0.7870
Xtxp168	0.5574	4	0.6031	0.5469	Xtxp331	0.1667	24	0.9186	0.9134
Xtxp177	0.3250	5	0.7365	0.6898	Xtxp340	0.3607	9	0.7811	0.7526
Xtxp207	0.9833	2	0.0328	0.0322	Xtxp355	0.3167	14	0.8233	0.8046
Xtxp208	0.9016	2	0.1774	0.1616	平均值	0.4306	10	0.6878	0.6615
					Mean				

从筛选出的抗旱材料(图 1)看,14 个抗旱材料的遗传距离值范围为 0.2059 ~ 0.8639,平均为 0.7312,其中 53H 和 L2381-1 之间遗传距离最小,为 0.2059。其次是 103R 和 0-01,距离为 0.2451; L2381-1 和 363C/2691 之间的距离为 0.3991;53H 和 363C/2691 之间的距离为 0.3866。由此可看出,在所选出的抗旱材料中,中国高粱恢复系之间的亲缘关系较近,遗传基础狭窄。中国高粱恢复系 L2381 与印度高粱 Ho277 遗传距离最大,遗传距离值为 0.8639, Ho277 与中国高粱 103R、0-01、363C/2691 的遗传距离值也都 0.8 以上,这进一步印证了中国高粱与印度高粱为高粱杂种优势利用的优势类群。

3 讨论

田间自然鉴定法简单易行,无需特殊设备,在产量表现上比设施鉴定更能充分表达品种的

产量水平,对育种材料和品种的抗旱性筛选十分有效。田间自然鉴定结果与大田实际情况接近,所获结果能够较充分地表达品种的生产性能和抗旱性,但该方法受降水等环境条件影响大,年际间鉴定条件难以一致,结果变化较大。所以,用田间自然鉴定法进行抗旱性鉴定,关键是试验地点的选择,试验点必须选择降雨量少、气候干旱的地区。

国内外抗旱鉴定大多采用设施鉴定,设施栽培中的温、光、水、肥、气等均能得到较好的调控,对系统研究高粱抗旱性能有较大的优越性,但设施鉴定方法对评价材料的产量性状有很大的局限性,大量的人为因素限制了产量的充分表达。20 世纪 80 年代初,山西省农业科学院高粱研究所曾在防雨棚采用抗旱系数法对 1000 余份中国高粱种质资源进行了抗旱鉴定筛选,但筛选出的抗旱材料仅仅反映出不同品种对干旱的敏感程度,不能反映品种的产量

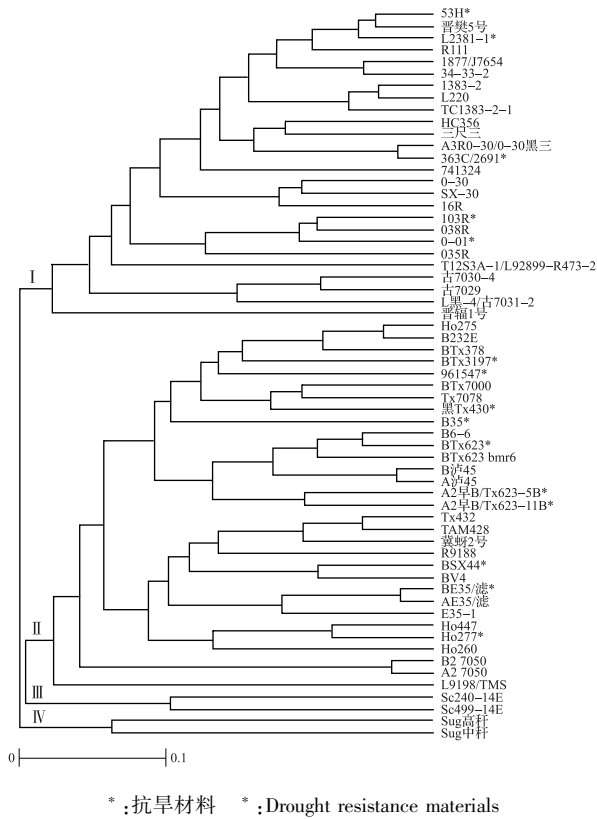


图 1 61 份高粱种质的 SSR 标记聚类图

Fig. 1 Clustering figure of 61 sorghum materials by SSR markers

水平,所以,筛选出的抗旱品种大多为早熟、生物量小、产量低的品种,育种家未能利用。本试验采用抗旱指数法进行田间自然鉴定筛选,兼顾了抗旱性和丰产性的综合评价,如 B35 是国际上著名的高粱抗旱材料^[14-16],在本试验中其抗旱系数最大,达到 0.95,单从抗旱性看是最好的抗旱材料,但抗旱性和丰产性综合评价中发现 BE35/糖和 A₂早 B/Tx623-5B 比 B35 具有更好的抗旱丰产性能,它们既有较好的抗旱性同时又具较高的丰产性能,在高粱育种和生产中有重要利用价值。

本研究中利用 SSR 标记对 61 份高粱材料的聚类分析表明,我国高粱恢复系之间的亲缘关系较近,这也说明我国目前的恢复系材料遗传基础狭窄,应在育种中拓宽恢复系的遗传基础。从聚类的不同类

群间看,我国高粱恢复系与印度高粱遗传距离最大,印度高粱 Ho277 与我国高粱 103R、0-01、363C/2691 的遗传距离值也都在 0.8 以上,这与高士杰等^[17]对中国杂交高粱的种质基础及优势利用模式研究的结果一致,高粱育种中还应加强在 A₂ 细胞质背景下充分利用中国与印度高粱杂种优势。

参考文献

[1] 山仑,黄占斌,岁岐张. 节水农业[M]. 北京:清华大学出版社,2000

[2] 姜文来. 中国 21 世纪水资源安全对策研究[J]. 水科学进展, 2001,12(1):66-71

[3] 景蕊莲. 作物抗旱节水研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2007,9(1):1-5

[4] 山仑,徐炳成. 论高粱的抗旱性及在旱区农业中的地位[J]. 中国农业科学,2009,42(7):2342-2348

[5] 董良利,平俊爱,张福耀,等. 抗旱、节水高粱新品种晋杂 101 的选育[J]. 作物杂志,2006(4):48-49

[6] 朴英华,何文安. 高粱抗旱性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009,37(36):17910-17913

[7] 牛天堂,赵学孟,赵继芳. 中国高粱品种资源抗旱性鉴定研究初报[J]. 高粱研究,1982(1):27-32

[8] 中国高粱品种资源目录 1982-1989(续编)[M]. 北京:农业出版社,1992

[9] 兰巨生. 作物抗旱指数的概念和统计方法(3)[J]. 华北农学报,1990,5(2)20-25

[10] 邹剑秋,李玥莹,朱凯,等. 高粱丝黑穗病菌 3 号生理小种抗性遗传研究及抗病基因分子标记[J]. 中国农业科学,2010, 43(4):713-720

[11] 魏添梅,昌小平,闵东红,等. 小麦抗旱品种的遗传多样性分析及株高优异等位变异挖掘[J]. 作物学报,2010,36(6): 895-904

[12] 李会勇,王天宇,黎裕,等. TP-M13 自动荧光检测法在高粱 SSR 基因型鉴定中的应用[J]. 植物遗传资源学报,2005,6 (1):68-70

[13] Liu K J, Muse S V. PowerMarker: an integrated analysis environment for genetic marker analysis[J]. Bioinformatics, 2005, 21: 2128-2129

[14] Sanchez A C, Subudhi P K, Rosenow D T, et al. Mapping QTLs associated with drought resistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) [J]. Plant Molecular Biology, 2002, 48: 713-726

[15] Kassahun B, Bidinger F R, Hash C T, et al. Stay-green expression in early generation sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] QTL introgression lines[J]. Euphytica, 2010, 172: 351-362

[16] Crasta O R, Xu W W, Rosenow D T, et al. Mapping of post-flowering drought resistance traits in grain sorghum: association between QTLs influencing premature senescence and maturity[J]. Mol Gen Genet, 1999, 262: 579-588

[17] 高士杰,刘晓辉,郭中校. 中国杂交高粱的种质基础及优势利用模式研究[J]. 中国农学通报,2005,21(10):106-109