

邵初阳, 何晓兰, 徐照龙, 等. 甜高粱种质资源多样性及主要农艺参数聚类分析[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(5): 984-994.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.05.007

## 甜高粱种质资源多样性及主要农艺参数聚类分析

邵初阳<sup>1</sup>, 何晓兰<sup>2</sup>, 徐照龙<sup>2</sup>, 张大勇<sup>2</sup>, 黄益洪<sup>2</sup>, 卫培培<sup>2</sup>, 许玲<sup>2</sup>, 刘晓庆<sup>2</sup>,  
郭士伟<sup>2</sup>, 彭陈<sup>2</sup>, 葛婷婷<sup>2</sup>, 王为<sup>3</sup>

(1. 山东农业大学生命科学院, 山东 泰安 271018; 2. 江苏省农业科学院农业生物技术研究所/江苏省农业生物学重点实验室, 江苏 南京 210014; 3. 江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏 盐城 224002)

**摘要:** 对在南京地区种植的 88 份国内外甜高粱种质资源的株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量、整株榨汁率、整株锤度及始花期 7 个主要数量农艺性状进行了调查与测定, 并进行了相关性、遗传多样性、主成分分析及聚类分析。这些种质资源各性状变异系数为 22.62%~52.51%, 遗传多样性指数为 1.83~2.03。从 7 个性状中提取出 2 个主成分进行主成分分析, 贡献值分别为 64.947% 和 18.285%。第 1 主成分与株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量及始花期的相关性都较高, 第 2 主成分与出汁率和锤度相关系数较高。聚类分析可将 88 份甜高粱资源分为 6 个类群, 从 II 和 III 类群中可以选出适合密植的早熟中秆材料, 如甜选 35、甜选 37 及甜选 39 等; 从 IV 和 V 类群中可选出植株高大、锤度高的晚熟材料, 如甜选 160、宁甜选 6 及黑穗芦稷等; 从 VI 类群可以选出生育期适中的材料, 如甜选 33、甜选 61 及甜选 133 等。表明供试的 88 份甜高粱种质资源具有丰富的遗传多样性。

**关键词:** 甜高粱; 农艺性状; 相关性; 主成分分析; 遗传多样性; 聚类分析

**中图分类号:** S513.024 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)05-0984-11

## Genetic diversity of sweet sorghum germplasm resources and clustering of major agronomical traits

SHAO Chu-yang<sup>1</sup>, HE Xiao-lan<sup>2</sup>, XU Zhao-long<sup>2</sup>, ZHANG Da-yong<sup>2</sup>, HUANG Yi-hong<sup>2</sup>, WEI Pei-pei<sup>2</sup>,  
XU Ling<sup>2</sup>, LIU Xiao-qing<sup>2</sup>, GUO Shi-wei<sup>2</sup>, PENG Chen<sup>2</sup>, GE Ting-ting<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>

(1. College of Life Science, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Institute of Agro-biotechnology, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Agricultural Biology of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China; 3. Institute of Agricultural Sciences in the Coastal Area of Jiangsu Province, Yancheng 224002, China)

**Abstract:** Seven major agronomic traits, including plant height, stem diameter, node number per stem, plant fresh weight, juice yield per plant, brix and first-flowering date, of eighty-eight domestic and foreign sweet sorghum cultivars planted in Nanjing area, were measured. The correlation, genetic diversity, principal components analysis and clustering were analyzed. The coefficients of variation and genetic diversity index of all agronomic characters

收稿日期: 2015-04-23

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(14)2001]; 江苏省农业科学院优秀科学家计划启动经费

作者简介: 邵初阳(1994-), 男, 山东青岛人, 本科, 研究方向为植物生物学与生物技术育种。

通讯作者: 何晓兰, (E-mail) lanygrass@aliyun.com

ranged from 22.62%–52.51% and 1.83–2.03, respectively. Two principal components (PCs) were extracted from seven agronomic traits by principal component analysis, and their contributions were 64.947% and 18.285%, respectively. PC I showed higher correlations with five agronomic traits of plant height, stem diameter, node number per stem, plant fresh weight and first-flowering date, however, PC II exhibited closer relationships with juice yield per plant and brix. Eighty-eight sweet sorghum cultivars were classified into six groups by clustering analysis. Early maturing cultivars suitable for compact planting were selected from groups II and III including Tianxuan35, Tianxuan37, Tianxuan39. Cultivars with moderate growth durations were selected from VI group, such as Tianxuan33, Tianxuan61, Tianxuan133. And late-maturing cultivars with higher biomass and brix were selected from groups IV and V, such as Tianxuan160, Ningtianxuan6, Heisui-luji. The results indicated that the genetic diversity was abundant in 88 sweet sorghum germplasms.

**Key words:** sweet sorghum; agronomic trait; correlation; principal component analysis; genetic diversity; clustering analysis

高粱 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] 是世界范围内第五大重要作物<sup>[14]</sup>, 甜高粱又叫芦粟、甜秆、糖高粱等, 是普通高粱的一个变种。甜高粱有 2 个光合产物贮藏库, 一个是穗部的籽粒, 含有淀粉、蛋白质、脂肪等营养物质; 一个是茎秆薄壁细胞中的糖, 含有葡萄糖、果糖和蔗糖等<sup>[5]</sup>。甜高粱可产  $6.0 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$  kg/hm<sup>2</sup> 富含糖分的茎秆和  $2.8 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^3$  kg/hm<sup>2</sup> 粮食, 是世界上生物学产量最高的作物<sup>[6]</sup>。研究甜高粱种质资源的遗传多样性, 不仅有助于了解甜高粱资源的遗传背景及资源间的亲缘关系, 为种质资源的利用与开发提供信息, 且有助于对种质资源进行区划, 为不同地域生态环境间的引种以及杂交优势的利用提供指导<sup>[7-9]</sup>。

目前, 对高粱资源的遗传评价主要利用表型性状和分子标记进行分析。如 Lekgari 等<sup>[10]</sup> 用 SSR、SRAP 以及形态学标记对 142 个甜高粱种质资源分别进行聚类分析, 3 种聚类群有很好的互补性, 以农艺性状的测定与分析为基础, 通过 SSR 标记对群体来源进一步细化, 再通过 SRAP 标记对群体育种来源再精细化。余传涨等<sup>[11]</sup> 采用 52 个 SSR 标记对 41 个高粱品种进行遗传多样性分析, 通过聚类分析将 41 个高粱品种分为 2 个类群。虽然多数籽粒高粱归在第 1 类群, 而甜高粱主要归在第 2 类群, 但无法清晰地划分 2 类高粱之间的遗传界限。相对于分子标记, 表型性状较直观, 是遗传多样性分析的基础。Hugo 等<sup>[12]</sup> 认为运用分子标记对高粱进行遗传多样性及群体结构的分析, 必须优先对更大的群体进行表型评价。杜光辉等<sup>[13]</sup> 认为在育种过程中, 应首先筛选出适合在本地生长的表现优良的种源, 根据农艺性状划分不

同类型, 再分析杂交亲本的分子遗传关系, 根据育种目标选择合理的杂交组合。

近年来, 中国多个地区与研究单位进行了甜高粱种质资源的引进, 多采用表型性状对引进资源进行初步的鉴定与分析<sup>[14-19]</sup>, 也筛选到一批适合各地区利用的优质甜高粱资源, 如冯国郡等<sup>[17]</sup> 采用多样性指数、变异系数和聚类分析等方法, 对国内外 72 份甜高粱种质资源的 24 个性状进行遗传多样性研究, 结果表明新疆现有甜高粱资源拥有丰富的遗传多样性, 聚类分析可将 72 份资源划分为四大类。宋旭东等<sup>[15]</sup> 对 196 份甜高粱材料进行了糖锤度测定及综合评价, 结果表明, 糖锤度  $\geq 21\%$  的材料 49 份, 其中 4 份高糖锤度材料可以根据育种目标和生产需求进行性状改良, 筛选和培育综合性状优良的材料, 有直接应用于生产的可能。

目前未见南京及其周边地区甜高粱种质资源的相关研究报道。本研究通过测定 88 份甜高粱品种的主要农艺性状并对其遗传多样性进行分析, 以期在南京以及周边地区开发利用甜高粱资源奠定基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

供试甜高粱资源 88 份, 为中国农业科学院作物科学研究所、江苏省农业科学院、江苏省沿海地区农业科学研究所、黑龙江农业科学院等单位提供 (表 1)。2013 年在江苏省南京市江苏省农业科学院农业生物技术研究所试验基地种植。从每小区中随机选取具有代表性的 3 株进行性状测定, 其平均数用作统计分析。

表 1 供试的 88 份甜高粱资源

Table 1 The 88 sweet sorghum accessions used in this study

序号	品种名称	来源	序号	品种名称	来源
1	甜高粱	黑龙江农业科学院	45	甜选 56	中国农业科学院
2	高秆猪抬头高粱	江苏省农业科学院	46	甜选 173	中国农业科学院
3	芦稷	江苏省农业科学院	47	甜选 182	中国农业科学院
4	甜高粱	黑龙江农业科学院	48	洋高粱(宁陕)	中国农业科学院
5	红高粱	江苏省农业科学院	49	宁甜选 3	自选
6	甜选 39	中国农业科学院	50	BABUSH	中国农业科学院
7	甜选 37	中国农业科学院	51	甜选 35	中国农业科学院
8	甜高粱	黑龙江农业科学院	52	甜选 133	中国农业科学院
9	甜选 35	中国农业科学院	53	甜秆高粱(垣曲)	中国农业科学院
10	大甜秆	中国农业科学院	54	甜选 171	中国农业科学院
11	甜选 33	中国农业科学院	55	甜选 20	中国农业科学院
12	甜选 38	中国农业科学院	56	甜选 119	中国农业科学院
13	甜高粱	中国农业科学院	57	甜选 184	中国农业科学院
14	甜什高粱	中国农业科学院	58	甜高粱	中国农业科学院
15	甜秆菱	中国农业科学院	59	甜秆高粱(石泉)	中国农业科学院
16	宁甜选 7	自选	60	甜选 175	中国农业科学院
17	甘蔗芦稷	江苏省农业科学院	61	甜选 160	中国农业科学院
18	甜选 44	中国农业科学院	62	甜选 123	中国农业科学院
19	大力士	市场购买	63	MN-2765	中国农业科学院
20	甜选 173	中国农业科学院	64	JUAR-3	中国农业科学院
21	甜选 41	中国农业科学院	65	黑甜高粱(宁陕)	中国农业科学院
22	甜选 160	中国农业科学院	66	甜选 61	中国农业科学院
23	甜选 97	中国农业科学院	67	小甜高粱(宁陕)	中国农业科学院
24	甜高粱(平陆)	中国农业科学院	68	MN-3466	中国农业科学院
25	甜芦粟	中国农业科学院	69	宁甜选 4	自选
26	甜选 29	中国农业科学院	70	宁甜选 5	自选
27	宁甜选 1	自选	71	宁甜选 6	自选
28	甜选 122	中国农业科学院	72	甘蔗芦稷	江苏省农业科学院
29	甜选 116	中国农业科学院	73	黑穗芦稷	江苏省农业科学院
30	甜选 100	中国农业科学院	74	黑穗芦稷	江苏省农业科学院
31	宁甜选 2	自选	75	盐甜选 3	江苏省农业科学院沿海地区农科所
32	甜选 181	中国农业科学院	76	芦稷	江苏省农业科学院
33	甜选 129	中国农业科学院	77	盐甜选 2	江苏省农业科学院沿海地区农科所
34	甜高粱	中国农业科学院	78	扫帚芦稷	江苏省农业科学院
35	芦稷	江苏省农业科学院	79	盐甜选 1	江苏省农业科学院沿海地区农科所
36	宁甜选 9	自选	80	盐甜选 6	江苏省农业科学院沿海地区农科所
37	黑穗芦稷	江苏省农业科学院	81	Rio	江苏省农业科学院沿海地区农科所
38	盐甜选 13	江苏省农业科学院沿海地区农科所	82	盐甜选 7	江苏省农业科学院沿海地区农科所
39	甜高粱	黑龙江农业科学院	83	BTX623	江苏省农业科学院沿海地区农科所
40	甘芝甜高粱	中国农业科学院	84	盐甜选 5	江苏省农业科学院沿海地区农科所
41	甜选 59	中国农业科学院	85	盐甜选 4	江苏省农业科学院沿海地区农科所
42	甜选 68	中国农业科学院	86	盐甜选 8	江苏省农业科学院沿海地区农科所
43	甜高粱(彭水)	中国农业科学院	87	宁甜选 8	江苏省农业科学院沿海地区农科所
44	甜选 90	中国农业科学院	88	宁甜选 11	自选

## 1.2 方法

1.2.1 测定方法 甜高粱株高( $X_1$ )、茎粗( $X_2$ )、茎节数( $X_3$ )和茎秆鲜质量( $X_4$ )的测定参照《高粱种质资源描述规范和数据标准》<sup>[20]</sup>。出汁率( $X_5$ )测定:用上海金鹊机械设备有限公司生产的电动甘蔗榨汁机进行一次性榨汁,出汁率=(整株茎秆鲜质量-整株茎秆渣质量)/整株茎秆鲜质量 $\times 100\%$ 。整株锤度( $X_6$ )测定:使用日本 ATAGOPAL-1 数显锤度计测定,用蒸馏水将锤度计调零,测定整株混合汁液。始花期( $X_7$ )测定:记录单株第一个小穗开花的日期并挂牌,计算出播种期到始花期之间的天数。以上测定均设3次重复。

1.2.2 数据统计分析方法 相关性分析:利用 EXCEL 2003 软件对测定结果进行整理和分类,利用 SPSS 17.0 软件中的双变量相关性分析对株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量、出汁率、整株锤度及始花期7个农艺性状进行相关分析。

遗传多样性分析:利用 Shannon-weaver 遗传多样性指数来衡量群体遗传多样性大小。首先,利用株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量、出汁率、整株锤度及始花期性状数据,根据平均数( $\bar{x}$ )和标准差( $\sigma$ )将每份材料分为10级,从第1级  $X_i < (\bar{x} - 2\sigma)$  到第10级  $X_i \geq (\bar{x} + 2\sigma)$ ,每0.5 $\sigma$ 标准差为1级。然后,计算每一组的相对频率( $p_i$ =某一性状第*i*级别内材料份数/总份数)。最后,计算遗传多样性指数,计算公式为: $H' = -\sum p_i \ln p_i$ <sup>[15]</sup>。

主成分分析:利用 SPSS 17.0 软件进行主成分分析。对7个数量性状数据的平均值进行降维主成分提取分析<sup>[21]</sup>。

聚类分析:利用 SPSS 17.0 软件进行聚类分析并制作树状图。对7个数量性状数据进行标准化转化处理,采用欧氏距离可变类平均法进行聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 南京地区甜高粱基本生长状况

在整个生育时期,供试的88个甜高粱品种生长有较明显的差异,13号甜高粱、58号甜高粱等早熟品种叶部蚜害与靶斑病发生较重,籽粒虫害较重,尤其紧穗型材料,而晚熟品种基本到10月下旬,甚至11月上旬籽粒才成熟,病虫害发病率较低。2013年7月32日南京经历一次台风,对早熟品种影响较大,其中大甜秆、甜秆茭、甜选173、BABUSH、MN-2765及JUAR-3等资源正

值拔节抽穗期,倒伏较严重。8月高温干旱,其中甜高粱(平陆)、甜高粱(编号13)等品种病虫害较重,而甜高粱(彭水)和洋高粱(宁陕)出现叶片皱缩黄化的缺水症状,明显不耐干旱。BABUSH中后期虽然长得高大粗壮,但根部难以支持,出现较严重的倒伏。

对88份甜高粱品种的始花期、株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量、出汁率和全株锤度进行了测定,结果显示各品种之间均存在较大差异(表2)。始花期最短的宁甜选4,仅57d,最长的甜秆高粱(石泉)为138d,相差81d;株高最低的甘蔗芦稷(编号17)为1.39m,最高的盐甜选5为4.95m,相差3.56m;茎粗最细的甜高粱(编号1)为1.30cm,最粗的黑穗芦稷(编号73)为3.46cm,相差2.43cm;茎节数最少的甜高粱(编号1)为4.67,最多的JUAR-3为21.67,相差17.00;茎秆鲜质量最轻的甜选116为112.17g,最大的BABUSH为1368.43g,相差1256.26g;出汁率最少的芦稷(编号35)和扫帚芦稷(编号78)的出汁率都为0,最多的盐甜选6为38.19%,相差38.19%;锤度最低的芦稷(编号35)和扫帚芦稷,锤度都为0,最高的盐甜选6为16.53%,相差16.53%(表2)。

### 2.2 主要农艺性状遗传多样性分析

供试甜高粱资源的株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量、出汁率、全株锤度以及始花期均存在较大的遗传多样性(表3)。茎秆鲜质量的变异幅度最大,变异系数达52.51%,其次为整株锤度,变异系数也高达38.14%。生育期的变异幅度最小,为22.64%。各性状的多样性指数值均较大,其中茎节数的多样性指数最大,为2.03,出汁率的多样性指数最低,为1.83。表明供试的88份甜高粱资源拥有丰富的遗传多样性,可供挖掘的价值很高。

### 2.3 主要农艺性状相关性分析

对始花期、茎秆鲜质量、株高、茎粗、茎节数、出汁率和整株锤度7个主要数量农艺性状进行了相关性分析,结果显示:这7个性状之间都呈极显著正相关。株高与茎粗、茎节数和茎秆鲜重的相关系数分别达0.6180、0.6984及0.7618,比与出汁率、锤度和始花期的相关性要高,锤度与出汁率的相关系数为0.6857,较与其他性状的的相关系数高。始花期与茎粗、茎节数和茎秆鲜质量相关系数分别为0.6071、0.6800和0.5962(表4),高于始花期与其他性状的相关系数。

表 2 甜高粱的主要农艺性状

Table 2 Major agronomic traits of sweet sorghum

编号	株高 (m)	茎粗 (cm)	茎节数	茎秆鲜质量(g)	出汁率 (%)	锤度 (%)	始花期 (d)
1	1.63±0.12	1.03±0.01	4.67±0.44	174.97±36.71	27.68±2.12	10.43±0.91	60.00±3.46
2	1.47±0.01	1.82±0.02	6.67±1.11	127.83±31.11	9.86±1.93	5.67±1.51	67.67±4.73
3	1.85±0.06	2.30±1.13	8.00±0	129.83±31.44	8.60±1.91	3.03±0.76	72.00±3.00
4	1.53±0.03	1.39±0.09	5.33±0.44	158.73±7.22	34.85±0.30	5.70±0.53	63.67±1.53
5	1.87±0.17	1.47±0.11	6.33±0.44	112.17±27.11	10.09±3.37	2.57±1.18	73.67±5.03
6	2.24±0.13	1.77±0.11	8.00±0.67	377.13±45.58	31.20±3.13	9.77±0.64	67.33±2.52
7	2.42±0.09	1.73±0.22	8.33±0.44	421.10±71.80	29.60±2.40	10.87±0.44	68.67±1.53
8	2.13±0.04	1.52±0.02	6.00±0	218.90±20.53	27.16±1.68	3.50±0.33	69.67±1.15
9	2.45±0.11	1.68±0.28	8.33±0.44	353.43±81.24	28.65±3.10	9.87±0.76	73.67±6.11
10	3.45±0.16	1.47±0.09	9.67±0.89	210.43±28.82	9.51±2.20	9.07±1.76	64.33±1.15
11	2.68±0.04	1.56±0.14	9.67±0.44	331.00±83.07	25.89±1.07	5.83±0.22	73.00±1.00
12	2.55±0.14	1.80±0.07	8.00±0	276.03±62.02	25.18±3.12	9.53±1.16	66.00±1.00
13	2.27±0.22	1.42±0.26	8.33±0.44	164.30±40.40	12.96±2.45	6.03±0.44	62.00±1.73
14	1.94±0.06	1.55±0.03	8.00±0	119.10±7.20	15.05±1.59	3.43±0.11	63.33±1.15
15	2.30±0.02	1.25±0.03	6.33±0.44	122.33±16.82	7.68±2.48	4.43±1.84	63.33±0.58
16	3.40±0.10	2.07±0.11	11.00±0.67	502.00±45.40	27.01±9.97	6.77±1.64	74.67±0.58
17	1.39±0.05	1.70±0.13	7.00±0.67	137.40±22.73	12.64±1.41	6.23±0.89	68.67±3.21
18	2.41±0.04	1.67±0.14	11.00±0.67	303.07±79.76	28.69±2.63	8.97±0.36	88.00±8.00
19	2.71±0.15	2.58±0.30	15.33±1.56	576.70±168.27	24.73±4.39	5.73±0.29	87.67±5.51
20	2.45±0.18	1.64±0.36	8.67±1.11	325.90±69.87	33.86±0.35	10.63±1.18	76.00±3.00
21	2.59±0.09	1.65±0.30	9.33±0.44	403.00±129.87	29.69±0.92	11.67±1.62	79.00±8.19
22	3.28±0.00	2.38±0.05	17.00±1.33	805.53±95.84	33.47±3.81	13.53±0.62	99.33±2.89
23	3.41±0.14	2.18±0.19	18.00±0.67	640.83±102.76	32.10±0.21	11.60±2.07	95.67±2.89
24	3.30±0.08	1.99±0.11	9.00±0	554.50±39.00	37.27±1.33	11.07±0.11	64.00±0
25	2.47±0.10	1.54±0.16	7.67±0.44	149.87±13.51	7.28±0.62	0	75.67±2.89
26	2.70±0.09	1.94±0.06	10.33±0.89	540.87±27.24	30.23±2.86	8.70±0.33	73.67±1.53
27	3.14±0.34	1.97±0.04	11.00±1.33	453.80±27.40	31.16±0.43	10.70±2.33	82.00±5.20
28	3.39±0.04	1.94±0.16	14.33±0.44	524.97±21.62	30.69±0.94	11.43±0.38	101.00±0
29	2.97±0.28	2.38±0.14	15.00±1.33	604.20±21.73	29.08±1.02	10.50±0.13	94.33±1.53
30	3.58±0.12	2.42±0.19	17.33±0.44	744.10±88.07	37.22±4.28	10.00±1.60	94.67±4.62
31	2.90±0.08	1.72±0.09	9.33±0.89	294.60±33.80	25.49±6.05	8.17±0.49	74.33±5.03
32	3.29±0.47	2.09±0.26	15.00±3.00	452.80±178.80	27.81±4.42	7.35±2.55	99.50±4.95
33	3.32±0.16	2.10±0.07	14.67±0.44	577.17±65.38	32.02±1.00	9.53±1.18	95.00±5.57
34	3.53±0.24	2.07±0.07	10.67±0.44	333.03±21.58	4.70±0	7.63±0	75.67±2.89
35	2.79±0.14	1.92±0.11	8.67±0.89	197.97±67.24	0	0	82.00±9.17
36	1.63±0	1.61±0.18	8.33±1.11	236.20±25.60	22.60±1.01	10.27±0.89	75.33±3.21
37	3.55±0.18	2.27±0.17	12.67±0.44	609.57±141.96	31.01±1.65	12.07±0.49	94.33±1.53
38	2.61±0.19	2.07±0.24	12.00±0	330.47±45.04	19.60±0.45	7.03±0.51	85.00±0
39	2.05±0.26	1.68±0.15	7.33±1.11	186.43±46.04	16.38±1.67	7.40±0.87	78.67±3.51
40	2.76±0.11	1.54±0.09	13.00±1.33	438.40±77.53	35.47±3.30	12.67±1.04	93.00±8.54
41	2.61±0.16	1.56±0.31	13.33±1.56	319.90±89.47	34.74±0.30	15.17±2.36	120.33±17.90
42	2.78±0.08	1.93±0.59	16.67±0.44	572.97±144.22	32.44±2.60	9.23±0.71	116.33±5.69
43	2.67±0.02	2.05±0	9.50±1.50	347.75±161.85	23.26±11.59	6.80±0.60	90.67±1.15
44	2.93±0.13	1.87±0.18	12.33±0.89	618.73±39.56	34.40±3.24	9.20±1.40	81.33±1.15

续表 2 Continued

编号	株高 (m)	茎粗 (cm)	茎节数 (n)	茎秆鲜质量(g)	出汁率 (%)	锤度 (%)	始花期 (d)
45	2.51±0.36	1.98±0.02	13.00±2.00	567.83±94.76	31.98±3.58	12.30±0.87	123.33±14.98
46	3.20±0.08	2.72±0.16	18.00±1.33	954.30±62.67	29.57±0.67	11.93±0.64	101.00±0
47	3.36±0.04	2.07±0.17	18.33±1.11	702.07±66.44	32.74±2.76	13.93±1.04	97.67±2.89
48	3.29±0.06	2.98±0.11	17.33±0.44	731.87±105.36	35.79±2.84	9.10±0.60	126.67±10.79
49	3.63±0.04	2.53±0.18	18.33±1.11	1 029.67±47.42	32.20±1.86	13.80±1.07	109.67±1.53
50	3.75±0.12	3.15±0.23	20.67±1.56	1 368.43±274.04	29.92±2.01	8.73±1.04	110.00±3.46
51	3.05±0.16	2.05±0.40	15.00±1.33	513.03±161.04	30.37±2.67	13.80±0.27	118.33±11.24
52	3.16±0.10	2.26±0.20	15.33±0.44	637.80±99.67	29.88±1.45	12.67±0.49	96.00±2.65
53	3.52±0.12	2.27±0.28	12.33±0.44	594.53±171.36	30.54±5.35	11.83±0.44	84.00±1.73
54	3.19±0.04	2.45±0.10	18.00±1.33	816.57±218.64	14.36±19.50	10.87±1.24	101.67±3.06
55	2.97±0.35	1.71±0.14	15.00±1.33	395.43±51.16	32.31±2.63	12.63±2.29	117.33±2.31
56	2.83±0.02	2.17±0.31	15.00±0.67	556.00±109.87	21.11±0.83	16.53±0.18	128.33±4.62
57	3.34±0.26	2.31±0.13	18.00±0.67	636.83±53.51	25.50±1.16	11.43±0.96	110.00±0
58	3.36±0.37	2.73±0.38	14.00±0.67	762.23±162.96	36.49±1.34	9.87±1.11	92.33±6.35
59	3.05±0.36	2.45±0.13	15.67±1.78	562.30±34.67	33.72±0.98	9.20±1.07	138.00±0
60	3.05±0.31	2.07±0.32	16.33±1.11	478.43±174.22	24.99±6.99	10.33±0.22	109.33±5.77
61	2.97±0.28	2.09±0.34	17.67±1.56	517.27±126.62	27.68±1.70	12.37±0.58	99.67±5.51
62	2.26±0.09	1.60±0.16	13.33±0.89	238.07±49.29	26.18±0.62	11.63±0.42	120.67±2.52
63	4.24±0.16	2.88±0.52	20.33±1.78	954.93±244.02	20.63±2.94	11.33±1.31	100.67±0.58
64	3.57±0	1.60±0.13	21.67±0.44	715.87±60.51	30.94±0.16	13.87±0.89	96.00±0
65	2.91±0.12	1.65±0.17	10.33±0.44	296.33±38.02	30.14±0.90	8.70±2.13	87.67±1.15
66	3.05±0.18	2.07±0.18	15.33±0.89	518.27±49.18	34.17±0.75	13.00±1.00	89.33±5.77
67	2.88±0.08	2.38±0.28	17.00±1.33	651.57±104.18	32.15±0.50	10.47±0.36	96.00±0
68	2.74±0.18	2.32±0.12	11.67±1.11	408.47±76.51	28.48±1.12	11.37±2.04	133.00±0
69	3.13±0.02	1.71±0.29	9.67±0.89	381.40±104.53	35.60±1.77	13.70±1.67	57.00±0
70	3.63±0.04	2.73±0.22	20.00±0	937.63±44.36	25.49±0.50	14.00±0.20	116.67±1.15
71	3.61±0.08	2.79±0.23	16.00±0.67	1 120.33±184.96	37.22±8.65	14.20±0.93	120.67±0.58
72	3.52±0.29	2.57±0.25	15.67±1.78	815.20±183.07	34.80±1.95	13.80±0.33	121.67±5.69
73	3.56±0.12	3.46±0.21	18.33±0.89	1 017.13±134.98	35.39±1.61	12.37±0.44	116.00±0
74	3.92±0.08	2.27±0.02	13.00±0	632.87±17.56	31.19±0.51	13.17±0.24	94.00±0
75	3.27±0.08	2.73±0.10	18.33±0.44	607.87±61.49	33.82±3.64	10.93±0.58	124.00±0
76	4.00±0.21	2.39±0.17	14.00±0	765.97±139.64	30.53±1.78	14.93±0.64	92.00±0
77	3.56±0.26	3.22±0.30	17.67±1.11	910.80±148.20	34.64±1.00	10.03±0.44	128.00±0
78	2.92±0.22	1.98±0.18	10.67±0.44	247.00±19.07	0	0	82.00±0
79	3.51±0.19	3.21±0.14	18.67±0.44	870.07±149.58	30.59±1.65	10.83±0.71	128.00±0
80	3.80±0.17	2.85±0.30	16.33±0.44	1 006.13±222.56	38.19±0.58	12.33±0.24	120.33±2.52
81	3.79±0.03	2.47±0.29	19.33±0.44	884.37±112.96	24.42±1.83	15.77±0.69	128.00±0
82	2.90±0.30	2.81±0.41	18.00±0.67	894.83±40.16	30.10±1.64	10.90±0.87	117.00±9.85
83	1.46±0.06	2.16±0.08	14.67±0.44	219.17±11.16	24.87±0.66	6.93±1.22	99.00±0
84	4.95±0.16	2.58±0.19	17.67±0.89	747.80±144.67	15.93±4.28	0	105.00±0
85	3.73±0.18	2.72±0.21	17.00±1.33	888.07±155.91	33.27±1.25	12.73±0.22	239.67±211.60
86	3.68±0.10	2.29±0.16	15.67±0.44	822.70±73.27	22.88±1.90	13.20±0.20	130.00±0
87	2.61±0.10	2.45±0.30	16.00±1.33	649.37±132.11	20.34±1.21	5.73±0.76	108.00±5.20
88	1.99±0.03	2.50±0.27	15.00±1.33	478.93±14.91	22.29±2.02	13.00±1.47	98.67±4.04

1~88 为甜高粱品种,名称见表 1。

表 3 甜高粱遗传多样性分析

Table 3 Analysis of genetic diversity of sweet sorghum

项目	株高 (m)	茎粗 (cm)	茎节数	茎秆鲜质量 (g)	出汁率 (%)	锤度 (%)	始花期 (d)
最大值	4.95	3.46	21.67	1 368.43	38.19	16.53	138.00
最小值	1.39	1.03	4.67	112.17	0	0	57.00
平均值	2.92	2.10	13.15	527.52	26.46	9.70	93.66
变异幅度	3.56	2.43	17.00	1 256.26	38.19	16.53	81.00
标准差	0.68	0.49	4.25	276.99	8.86	3.70	21.18
变异系数	23.36	23.45	32.34	52.51	33.49	38.14	22.62
多样性指数	2.01	2.02	2.03	1.93	1.83	1.99	1.98

表 4 甜高粱各性状间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient among major agronomic traits in sweet sorghum

性状	株高	茎粗	茎节数	茎秆鲜质量	出汁率	锤度
株高						
茎粗	0.618 0 **					
茎节数	0.698 4 **	0.758 2 **				
茎秆鲜质量	0.761 8 **	0.838 6 **	0.841 5 **			
出汁率	0.321 6 **	0.317 6 **	0.423 0 **	0.533 6 **		
锤度	0.377 1 **	0.288 7 **	0.514 1 **	0.535 8 **	0.685 7 **	
始花期	0.456 4 **	0.607 1 **	0.680 0 **	0.596 2 **	0.352 8 **	0.438 0 **

\*\*表示相关性达 0.01 显著水平。

#### 2.4 甜高粱各性状对生物量影响的主成分分析

不同甜高粱材料的农艺性状值比较离散,利用主成分分析可以将离散的数据标准化处理,以便对样品的相似性进行明显的评价。从始花期、茎秆鲜质量、株高、茎粗、茎节数、出汁率和锤度 7 个特征根中选取了 2 个较大的特征根及相应的 2 个特征向量。第 I 主成分的贡献率为 64.947%,第 II 主成分的贡献率为 18.285%,前 2 个主成分的累计贡献率高达 83.232%。完全符合主成分分析的要求,故取前 2 个主成分作为分析的有效成分(表 5)。第 1 主成分与株高、茎粗、茎节数、茎秆鲜质量及始花期这 5 个性状值相关性都较高,分别为 0.80、0.82、0.90、0.95 及 0.80,与出汁率和锤度的相关系数略低,为 0.64 和

0.67,表明第 I 主成分可大部分说明甜高粱的生物量。第 II 主成分与出汁率和锤度相关系数较高,分别为 0.65 和 0.62,与其他性状都呈负相关,且相关系数绝对值较小,表明主成分 2 主要反应茎秆汁液情况(表 6)。

表 5 2 个主成分的特征值以及贡献率

Table 5 Eigen values of two principal components and their contributions

主成份	特征值	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)
I	3.897	64.947	64.947
II	1.097	18.285	83.232

表 6 2 个主成分的各因子载荷矩阵

Table 6 Loading matrix of each principal component

主成分	株高 (X1)	茎粗 (X2)	茎节数 (X3)	茎秆鲜质量 (X4)	出汁率 (X5)	锤度 (X6)	始花期 (X7)
I	0.80	0.82	0.90	0.95	0.64	0.67	0.80
II	-0.28	-0.39	-0.18	-0.14	0.65	0.62	-0.28

## 2.5 对 88 个甜高粱材料农艺性状的综合分析

表 6 为 2 个主成分的各因子载荷矩阵,表 7 为 2 个主成分得分系统矩阵,据此可获得各因子的得分公式,如下: $F1 = 0.17X1 + 0.18X2 + 0.20X3 + 0.21X4 + 0.14X5 + 0.15X6 + 0.18X7$

$F2 = -0.23X1 - 0.34X2 - 0.15X3 - 0.10X4 + 0.61X5 + 0.57X6 - 0.08X7$

根据  $F1$  和  $F2$  值,各品种的综合得分: $F = \sum WiFi = 0.64947F1 + 0.18285F2$ <sup>[19]</sup>

根据算出的  $F$  值,对 88 个甜高粱材料进行排序(表 8),并且利用系统分析方法的类间平均法进行聚类分类,可将 88 份材料分为 6 类(图 1)。以各类群主要农艺性状的平均值为参考,对其特征进行分析,结果显示这 6 类群之间存在较大差异(表 9)。

I 类群仅 1 份材料 BABUSH,而其余的 5 个类群从属一个大亚群。BABUSH 与其他 5 类群的材料遗传距离较远,其株高、茎粗、茎节数及茎秆鲜质量在 6 个类群中最高,综合性状排序位于第一位,但锤度仅为 8.73%,出汁率也低于 30.00%,且该材料有易倒伏的缺点。

II 和 III 类群共 40 份材料,始花期较短,都不足 3 个月,且植株低矮,单株茎秆鲜质量不足 500 g。尤其第 II 群,平均株高仅有 2.08 m,茎秆鲜质量仅达 175.04 g,且锤度平均值仅达 5.35%。综合性状排序倒数几位的材料都在该群,如甜什高

粱、甜秆茭以及盐甜选 5 等。但从 II 类群中可选择到锤度高的早熟密植型材料,如甜选 35、甜选 37 及甜选 39。

IV 和 V 类群生物量较大,但平均始花期偏长。其中第 IV 群平均茎秆鲜质量达 951.65 g,平均锤度在 6 个类群中最高,出汁率仅次于第 V 类群,该类群材料占总材料的 14.77%。综合性状排前几名的材料都在该群,如宁甜选 6、宁甜选 3 及黑穗芦稷(编号 73)等;第 V 类群,平均株高达 3.66 m,仅次于 BABUSH。出汁率在 6 个类群中最高,平均茎秆鲜质量达 761.33 g,平均始花期早 IV 类群 10.27 d。

第 VI 类群,占总资源的 27.27%,其各项指标都低于 IV 和 V 类群,但高于 II 和 III 类群,处于中等水平。生物量不低,生育期 135 d 左右,能从中选择到符合南京小麦茬口的甜高粱材料,如甜选 33、甜选 61 及甜选 133 等。

总体来看,从 II 和 III 类群可以选出适合密植的早熟中秆材料,如甜选 35、甜选 37 及甜选 39 等;从 IV 和 V 类群中可选出植株高大,锤度高的材料,如甜选 160、宁甜选 6 及黑穗芦稷等;从 VI 类群可以选出生育期适中材料,如甜选 33、甜选 61 及甜选 133 等。这些材料可作为南京及周边地区推广示范品种或作亲本材料。

表 7 2 个主成分得分系统矩阵

Table 7 System matrix of each principal component scoring

主成分	株高 (X1)	茎粗 (X2)	茎节数 (X3)	茎秆鲜质量 (X4)	出汁率 (X5)	锤度 (X6)	始花期 (X7)
I	0.17	0.18	0.20	0.21	0.14	0.15	0.18
II	-0.23	-0.34	-0.15	-0.10	0.61	0.57	-0.08

## 3 讨论

茎秆含糖量是甜高粱作为能源材料的一个最重要的性状。宋旭东等<sup>[15]</sup>发现甜高粱茎秆内部有的实心多汁,有的空心少汁,即使是糖锤度相同的品种,也会因实心多汁、空心少汁的原因出现生物学产量不同的结果,而导致加工效率的不一样。在我们的试验中也发现这一现象,甜高粱的整株锤度与出汁率的相关系数达极显著水平,但部分

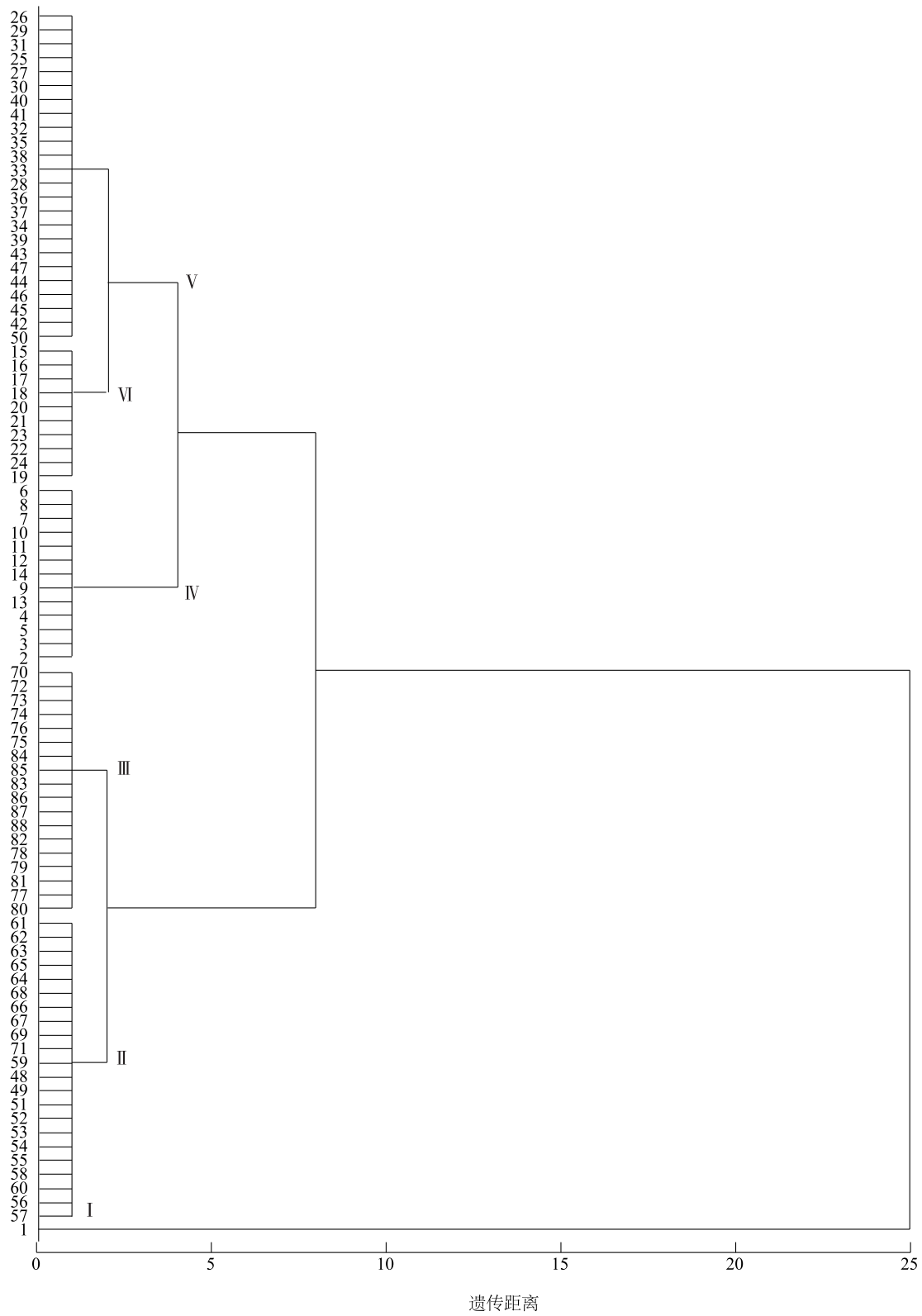
甜高粱不符合这一规律,如甜高粱(编号 8)的出汁率为 27.16%,而整株锤度只有 3.50%;Rio 出汁率也偏低,为 24.42%,但整株锤度最高达 15.77%,因此在甜高粱选育过程中,对锤度与出汁率要兼顾考虑。此外,与赵香娜等<sup>[19]</sup>的测定锤度方法一致,我们也采用小型压榨机进行一次性压榨,压榨率偏低,但本试验中每个样品采取同一标准操作,所得结果可以充分体现资源材料出汁率的差异。

表 8 甜高粱综合性状排序

Table 8 The ranking of comprehensive traits of sweet sorghum

编号	F 值	综合排序	编号	F 值	综合排序
1	34.74	78	45	90.11	36
2	25.97	85	46	133.88	6
3	26.12	84	47	104.51	24
4	33.72	79	48	110.65	19
5	24.16	88	49	144.62	3
6	60.50	60	50	183.87	1
7	65.82	56	51	83.31	42
8	39.77	74	52	95.61	29
9	57.92	61	53	88.91	38
10	36.45	76	54	127.30	13
11	54.07	65	55	69.34	55
12	47.20	71	56	88.23	39
13	30.57	81	57	96.18	27
14	25.19	86	58	110.64	20
15	24.22	87	59	91.06	34
16	75.19	50	60	76.77	48
17	27.85	83	61	81.41	46
18	53.52	66	62	49.41	70
19	85.22	41	63	132.47	8
20	56.03	63	64	105.96	22
21	65.01	57	65	52.87	67
22	116.92	17	66	81.55	45
23	96.44	26	67	97.42	25
24	82.82	43	68	71.23	54
25	28.04	82	69	61.73	58
26	80.53	47	70	133.37	7
27	71.68	53	71	157.31	2
28	82.52	44	72	120.55	15
29	90.85	35	73	144.16	4
30	109.23	21	74	94.96	31
31	50.23	69	75	95.69	28
32	72.56	51	76	110.91	18
33	88.04	40	77	132.09	9
34	51.18	68	78	39.26	75
35	33.20	80	79	126.74	14
36	43.04	73	80	143.58	5
37	91.93	32	81	128.26	12
38	54.57	64	82	128.34	11
39	35.70	77	83	43.93	72
40	72.31	52	84	105.06	23
41	61.38	59	85	128.48	10
42	89.92	37	86	119.96	16
43	57.58	62	87	95.19	30
44	91.67	33	88	75.53	49

1~88 为甜高粱品种,名称见表 1。



I ~ VI表示6个类群。1 ~ 88 为甜高粱品种,名称见表1。

图1 88份甜高粱材料聚类分析

Fig.1 Dendrogram of 88 sweet sorghum cultivars by clustering analysis

表 9 各类群甜高粱农艺性状平均值

Table 9 Average values of agronomic traits in each group

类群	株高 (m)	茎粗 (cm)	茎节数 (n)	茎秆鲜质量 (g)	出汁率 (%)	锤度 (%)	始花期 (d)	占总资源 百分比(%)
I	3.75	3.15	20.67	1 368.43	29.92	8.73	110.00	5.56
II	2.73	1.84	11.05	372.75	27.67	10.11	87.05	25.00
III	2.08	1.63	8.17	175.04	15.19	5.35	74.54	20.45
IV	3.57	2.83	18.15	951.65	30.72	12.39	115.80	14.77
V	3.66	2.40	16.87	761.33	31.08	11.22	105.53	11.36
VI	3.11	2.20	14.62	582.00	30.14	10.80	99.46	27.27

刘洋等<sup>[16]</sup>认为锤度与生育期、单株鲜质量、株高以及茎粗相关性不显著,而本研究结果与其完全相反,甜高粱整株锤度与始花期、茎秆鲜质量、株高、茎粗、茎节数以及出汁率都呈极显著相关。这可能与南京地区的气候环境以及播种期有关。6月初播种,早熟矮秆材料在9月份已陆续成熟,南京早秋依然处于高温期,昼夜温差小,不利早熟品种糖分的积累,且植株旺盛生长期恰逢高温高湿的气候条件,病虫害发病较重,而晚熟材料几乎不发病,另外,中晚熟材料在10-11月份才陆续成熟,后期昼夜温差很大,有利高秆晚熟材料糖分的积累。

本研究中甜选35、甜选44、甜选90等始花期都不到90d,其整株锤度分别为9.87%、8.97%及9.20%,与刘洋等<sup>[16]</sup>的研究结果差异较大。原因可能是我们用整株榨汁液来测定不同材料锤度的方法有关,另外,也可能与南京当年的环境条件及播期有相当大的关系。陈展宇等<sup>[22]</sup>研究发现在半干旱生境下,甜高粱品种茎秆锤度较半湿润生境下均有不同程度增加,差异达显著水平。我们对中晚熟品种Rio进行分期播种试验,发现播期对锤度有明显影响,5月21日播种的锤度较5月30日播种的低20.12%。

#### 参考文献:

- [1] 王志春,王永慧,陈建平,等. 氮磷钾肥配施对盐碱地甜高粱产量及干物质积累的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(11):80-81.
- [2] 郭晓丽,时丽冉,王广才,等. 干旱胁迫对不同高粱品种生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2013,41(2):91-93.
- [3] 翟国伟,王华,邹桂花,等. 高粱芒基因 *Aun3.1* 的精细定位[J]. 江苏农业学报,2014,30(3):486-490.
- [4] CLAIRE B, PUNNA R, SOPHIE B, et al. Massine sorghum collection genotyped with SSR markers to enhance use of global genetic resources[J]. Plos One, 2013,8(4):e59714.
- [5] 卢庆善. 甜高粱[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2008.
- [6] 刘晓辉,高士杰,杨明,等. 浅谈甜高粱的利用价值[J]. 种子,2006,25(9):98-99.
- [7] TARIQ S, KAZUTOSHI O. Diversity assessment of sorghum germplasm and its utilization in genetic analysis of quantitative traits-A review[J]. AJCS, 2014, 8(6):937-944.
- [8] 卢庆善,邹剑秋,朱凯,等. 高粱种质资源的多样性和利用[J]. 植物遗传资源学报,2010,11(6):798-801.
- [9] 王黎明,焦少杰,姜艳喜,等. 不同来源甜高粱种质资源的表型遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报,2014,15(2):411-416.
- [10] LEKGARI A, DWEIKAT I. Assessment of genetic variability of 142 sweet sorghum germplasm of diverse origin with molecular and morphological[J]. Markers Open Journal of Ecology,2014,4:371-393.
- [11] 余传涨,翟国伟,邹桂花,等. 41个高粱品种遗传多样性的SSR标记检测[J]. 江苏农业学报,2010,26(2):248-253.
- [12] HUGO E C, LOUIS K P. Assessment of molecular diversity and population structure of the Ethiopian sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] germplasm collection maintained by the USDA-ARS national plant germplasm system using SSR markers[J]. Genet Resour Crop Evol, 2013, 60:1817-1830.
- [13] 杜光辉,吴丽艳,段继强,等. 基于农艺性状和ISSR标记分析亚麻种源的变异及遗传关系[J]. 植物资源与环境学报,2009,18(3):11-19.
- [14] 曹文伯. 我国甜高粱种质资源鉴定及利用概况[J]. 植物遗传资源学报,2001,2(1):58-62.
- [15] 宋旭东,张桂香,史红梅,等. 甜高粱资源的鉴定与利用评价[J]. 天津农业科学,2012,18(1):119-122.
- [16] 刘洋,罗萍,林希昊,等. 甜高粱主要农艺性状相关性及其遗传多样性初析[J]. 热带作物学报,2011,32(6):1004-1008.
- [17] 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.
- [18] 严洪冬,焦少杰,王黎明,等. 黑龙江省甜高粱种质资源鉴定与评价[J]. 黑龙江农业科学,2013(3):3-6.
- [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] 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.
- [21] 孙璐,周宇飞,汪澈,等. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学,2012,45(9):1714-1722.
- [22] 陈展宇,邓川,边鸣镝,等. 不同生态环境对甜高粱生长、锤度及产量的影响[J]. 作物杂志,2013(1):58-61.

(责任编辑:袁伟)